

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою «Динаміка і міцність машин»  
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
на тему: «Оцінювання довговічності металевих конструкцій в умовах  
малоциклового багатовісного непропорційного навантажування»**

Виконав (-ла):  
студент (-ка) VI курсу, групи МП-92мп  
Саймбетов Руслан Дальжанович \_\_\_\_\_

Керівник:  
доктор технічних наук, професор  
Шукаєв Сергій Миколайович \_\_\_\_\_

Рецензент:  
д.т.н., проф.  
Данильченко Ю.М. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Динаміка і міцність машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Саймбетов Руслан Дальжанович**

1. Тема дисертації «Оцінювання довговічності металевих конструкцій в умовах малоциклового багатовісного непропорційного навантажування», науковий керівник дисертації Шукраєв Сергій Миколайович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації: 10.12.2020 р.

3. Об'єкт дослідження: багатовісне втомне руйнування металевих матеріалів.

4. Предмет дослідження: критерії втомної довговічності за багатовісного пропорційного і непропорційного циклічного навантажування.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) Підготувати огляд експериментальних робіт з дослідження ефектів малоциклового втомного руйнування металів за умови багатовісного навантажування (надати перевагу роботам за останні 5-ть років); критеріїв граничного стану за багатовісного малоциклового втомного руйнування; моделей оцінювання довговічності елементів конструкцій за умови малоциклового багатовісного навантажування;

- 2) Виконати порівняльний аналіз моделей оцінювання довговічності металевих сплавів за малоциклового багатовісного навантажування, ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень металевих сплавів за умови багатовісного малоциклового втомного руйнування;
- 3) Сформулювати рекомендації з використання моделей оцінювання довговічності елементів металевих конструкцій за умови багатовісного малоциклового навантажування;
- 4) Дати приклади застосування рекомендованих підходів до оцінювання довговічності елементів металевих конструкцій;
- 5) розробка стартап–проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 18.

7. Орієнтовний перелік публікацій – 1.

8. Дата видачі завдання: 01.09.2020 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури	01.09.20 - 19.09.20	Виконано
2	Огляд експериментальних робіт з дослідження ефектів малоциклового втомного руйнування металів за умови багатовісного навантажування	20.09.20 – 09.10.20	Виконано
3	Порівняльний аналіз розрахунків за критеріями губера-мізеса і фатемі-сосі з експериментальними результатами	10.10.20 – 31.10.20	Виконано
4	Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних	01.11.20 – 19.11.20	Виконано
5	Стартап-проект та висновки	20.11.20 – 10.12.20	Виконано

Студент

Руслан САЙМБЕТОВ

Науковий керівник

Сергій ШУКАЄВ

## РЕФЕРАТ

Саймбетова Р.Д. Оцінювання довговічності металевих конструкцій в умовах багатовісного малоциклового навантажування

Робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку літератури, який містить 12 найменувань. Загальний обсяг дипломної роботи складає 88 сторінок друкованого тексту, 29 малюнків, 21 таблиць.

Робота присвячена розробці методів оцінювання граничного стану металевих сплавів за пропорційного та непропорційного циклічного навантажування.

Головною метою роботи є аналіз придатності моделі критичної площини Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів конструкцій в умовах пропорційного і непропорційного циклічного навантажування.

Оцінювання даної моделі проводилось шляхом порівняння результатів розрахунків з дослідними даними, отриманими на тонкостінних трубчатих зразках з конструкційної сталі 45 і титанових сплавів ВТ1-0 та ВТ9 за їх одночасного навантажування осьовою силою та крутним моментом з контролем за деформаціями.

Представлено детальний опис і методику розрахунку основних компонентів даної моделі для таких типів траєкторій навантаження, як розтягання-стискання, знакозмінне кручення, пропорційне і непропорційне навантаження.

Результатом розрахунку є графічне представлення кривих довговічності у подвійних логорифмічних координатах для досліджуваних сплавів, а також графіки залежності між результатами експерименту і розрахунку.

Ключові слова: втома матеріалів, критерії втоми, багатовісне навантаження, пропорційне і непропорційне навантаження.

## ЗМІСТ

## ВСТУП

1. ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ ЗА УМОВИ БАГАТОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ. КРИТЕРІЇ ГРАНИЧНОГО СТАНУ.	8
1.1. Просте (пропорційне) і складне (непропорційне) навантажування	8
1.2. Вплив виду напруженого стану на пружно-пластичне деформування і довговічність металевих сплавів за умови багатовісного циклічного навантажування	10
1.3. Критерії граничного стану за умови складного циклічного навантажування.	17
1.3.1 Силові критерії	17
1.3.2 Деформаційні критерії	20
1.3.3 Енергетичні	23
1.3.4 Критерії що ґрунтуються на концепції «критичних площадок»	23
1.4. Висновки	26
2. МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ І РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ВТ1-0, ВТ9 ТА СТАЛІ 45 В УМОВАХ БАГАТОВІСНОГО МАЛОЦИКЛОВОГО НАВАНТАЖУВАННЯ	28
2.1. Методика втомних випробувань тонкостінних трубчастих зразків за пропорційного та непропорційного навантажування.	28
2.2. Механічні та циклічні характеристики титанового сплаву ВТ1-0. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.	39
2.3. Механічні та циклічні характеристики титанового сплаву ВТ9. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.	43
2.4. Механічні та циклічні характеристики сталі 45. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.	47
2.5. Висновки	50
3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКІВ ЗА КРИТЕРІЯМИ ГУБЕРА-МІЗЕСА І ФАТЕМІ-СОСІ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ	51
3.1. Методика оцінювання довговічності металевих сплавів за критеріями Губера-Мізеса і Фатемі-Сосі.	51
3.2. Результати розрахунків довговічності титанових сплавів ВТ1-0, ВТ9 та сталі 45 в умовах багатовісного малоциклового навантажування.	52

3.3. Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних.	58
3.4. Висновки.	68
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	69
4.1. Опис ідеї проекту	69
4.2. Технологічний аудит	69
4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту	75
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	77
5. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	79
6. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	80

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Характерною особливістю експлуатації сучасних машин та агрегатів, зокрема в галузях енергетичного і транспортного машинобудування, авіакосмічної техніки, хімічної промисловості, є їх робота в умовах багатовісного малоциклового навантажування, яке, як правило, є непропорційним. Оцінювання втомної довговічності металевих сплавів в умовах складного напруженого стану є актуальною задачею сучасного машинобудування. Розв'язання даної проблеми потребує удосконалення методів розрахунку на міцність, які мають більш точно враховувати умови експлуатації та властивості конструкційних матеріалів, адже необхідно одночасно враховувати такі фактори, як вид напруженого стану, тип траєкторії навантажування, чутливість матеріалу до непропорційності навантажування тощо.

Достовірність відомих критеріїв багатовісної малоциклової втоми обмежена як за типами матеріалів, так і за діапазоном співвідношень компонент тензора напружень (деформацій). При цьому історія навантажування, як правило, не враховується. Тому дуже актуальним є розширення класів матеріалів, до яких можна застосовувати відомі критерії.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є аналіз придатності моделі критичної площини Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів конструкцій, виготовлених з конструкційних сталей і титанових сплавів, в умовах пропорційного і непропорційного циклічного навантажування.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися наступні задачі:

- проаналізовано існуючі підходи до оцінювання довговічності елементів конструкцій за багатовісного пропорційного і непропорційного циклічного навантажування;
- виконано порівняльний аналіз моделей багатовісного втомного руйнування на основі результатів експериментальних досліджень,

виконаних для конструкційних сталей та титанових сплавів в умовах багатовісного втомного руйнування;

- сформульовано рекомендації щодо використання розглянути критеріїв багатовісної втоми.

**Об'єкт дослідження:** багатовісне втомне руйнування металевих матеріалів.

**Предмет дослідження:** критерії втомної довговічності за багатовісного пропорційного і непропорційного циклічного навантажування.

**Методи досліджень.** У даній роботі використовувались класичні методи й моделі теорій пружності, пластичності і втоми матеріалів. Числові обчислення здійснювалися у програмному середовищі Excel. Для апроксимації експериментальних результатів використовувався метод найменших квадратів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Здійснено порівняльний аналіз результатів оцінювання втомної довговічності за моделлю критичної площадки Фатемі-Сосі з експериментальними даними досліджень металевих сплавів в умовах багатовісного втомного руйнування.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у сформульованих рекомендаціях щодо використання моделі Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів машин та конструкцій за багатовісного циклічного навантажування.

**Особистий внесок здобувача.** Виконано порівняльний аналіз моделей багатовісного втомного руйнування на основі результатів експериментальних досліджень металевих сплавів в умовах пропорційного і непропорційного багатовісного циклічного навантажування. Сформульовано рекомендації щодо використання моделі Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів конструкцій, які експлуатуються в умовах складного напруженого стану.

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, \_\_\_\_\_ розділів, висновків, списку використаних джерел і \_\_ додатків. Загальний обсяг дисертації складає \_\_ сторінок, у тому числі основного тексту дисертації \_\_ сторінки, \_\_ рисунків, \_\_ таблиць, список використаних джерел із \_\_ найменувань на \_\_ сторінках, додатків на \_\_ сторінках, що містять \_\_ рисунків.



# 1. ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ ЗА УМОВИ БАГАТОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ. КРИТЕРІЇ ГРАНИЧНОГО СТАНУ.

За статистикою, близько 90% руйнувань та аварій, що виникають за час експлуатації машин і механізмів, пов'язано з втоми рйнуванням. Згідно з державним стандартом України ДСТУ 2825-94 [1] під втомою розуміють процес поступового накопичення пошкоджень, утворення та розвитку тріщин у матеріалі під дією циклічного навантажування. Здатність матеріалу протистояти втомі називається *витривалістю*.

Поняття втоми охоплює дві області циклічного навантажування і деформування, а саме багатоциклову і малоциклову втому. Принциповою відмінністю малоциклової втоми від багатоциклової є наявність пластичних деформацій у кожному циклі деформування.

## 1.1. Просте (пропорційне) і складне (непропорційне) навантажування

Багато відповідальних деталей машин і елементів конструкцій працюють в умовах багатовісного навантажування. Наприклад, на рис. 1 зображено цикли навантажування нормальних і дотичних напружень у перерізі  $n - n$  лопатки газотурбінного двигуна [2].

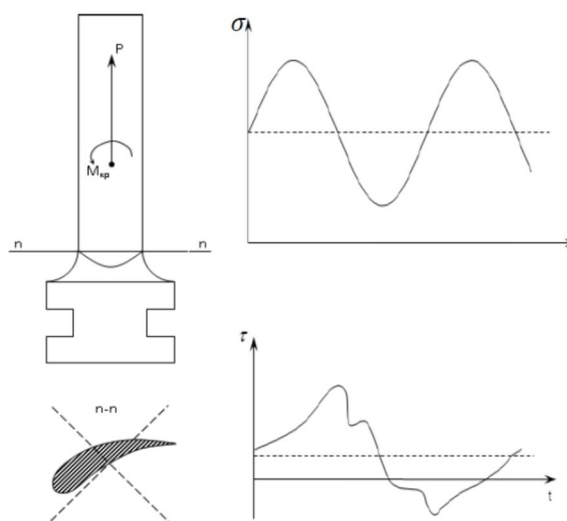


Рис. 1

Багатовісне навантажування поділяють на пропорційне та непропорційне. В першому випадку направляючий тензор напружень (деформацій) залишається сталим протягом всього процесу навантажування, що має місце, тоді коли зовнішні навантажування зростають або зменшуються пропорційно до одного параметру (Рис.2). За пропорційного навантажування вісі головних напружень та деформацій залишаються незмінними весь час навантажування.

Математично точне визначення пропорційного деформування записується таким чином

$$C_1 \varepsilon_x(t) = C_2 \varepsilon_y(t) = C_3 \varepsilon_z(t) = C_4 \gamma_{xy}(t) = C_5 \gamma_{yz}(t) = C_6 \gamma_{zx}(t)$$

або

$$\varepsilon_{ij}(t) = C(t) \varepsilon_{ij}^0$$

де  $\varepsilon_{ij}^0$  - постійний ненульовий тензор деформацій і  $C(t)$ , - змінний у часі скаляр. В цьому випадку, всі шість компонент тензора деформацій зв'язані пропорційною залежністю в усіх точках і в часі рядом констант. В просторі деформацій цей тип навантажування завжди буде представлено у вигляді прямої лінії.

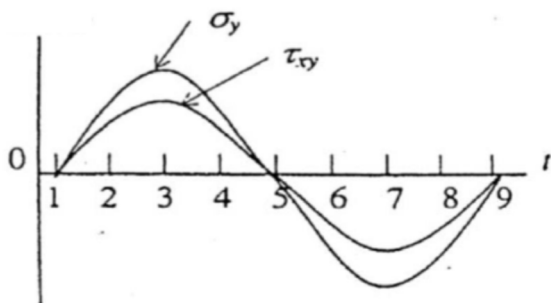


Рис.2 Пропорційне навантажування

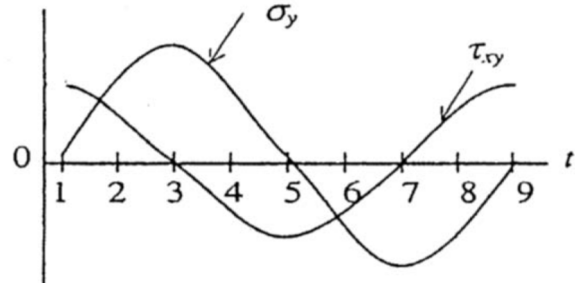


Рис. 3 Непропорційне навантажування

В той час, як непропорційне навантажування виникає, коли вісі головних напружень і деформацій обертаються під час навантажування (рис 3).

Багатовісне непропорційне циклічне навантажування за умови перевищення напруженнями границі текучості призводить до виникнення у матеріалі ефектів, які або не проявляються, або слабо виражені за простих режимів циклічного деформування (розтягання-стискання, знакозмінне кручення).

Виявлені відмінності у поведінці матеріалів за пропорційного та непропорційного малоциклового навантажування у значній мірі впливають на довговічність елементів конструкцій, тобто виникає потреба у врахуванні типу навантажування в рівняннях малоциклової втоми.

#### 1.2 Вплив виду напруженого стану на пружно-пластичне деформування і довговічність металевих сплавів за умови багатовісного циклічного навантажування

Експериментальні дослідження свідчать, що за непропорційного циклічного деформування для деяких металевих сплавів та чистих металів (наприклад, нержавіючі сталі, титанові сплави та мідь) характерним є циклічне зміцнення, яке перевищує величину циклічного зміцнення за пропорційного навантажування. Зміцнення є тим більшим, чим більше процес навантажування відрізняється від пропорційного. За однакової амплітуди еквівалентної деформації різниця між максимальними напруженнями в циклі може досягати 3 і більше разів. Цей ефект отримав назву - **ефект додаткового зміцнення**.

На рис. 4 представлено діаграми деформування за статичного і циклічного деформування у еквівалентних напруженнях і деформаціях за Мізесом, отримані експериментально на тонкостінних трубчатих зразках з алюмінієвого сплаву 2024-T3 [3]. Навантажування зразків здійснювали осьовою силою та крутним моментом. Як видно з графіків, діаграма деформування за монотонного навантажування лежить нижче циклічних діаграм деформування. Діаграми деформування за простих видів циклічного деформування (розтягання-стискання, кручення) та пропорційного навантажування практично збігаються між собою і розташовуються вище за діаграму статичного навантажування.

У роботі [4] зроблено припущення, що обертання головних осей деформації, яке має місце у кожному циклі, при непропорційному циклічному навантажуванні перешкоджає створенню в матеріалі стабільних дислокаційних структур. В результаті цього циклічна діаграма деформування при

непропорційному навантажуванні розміщується вище відповідної кривої пропорційного навантажування, що добре видно з рис. 4.

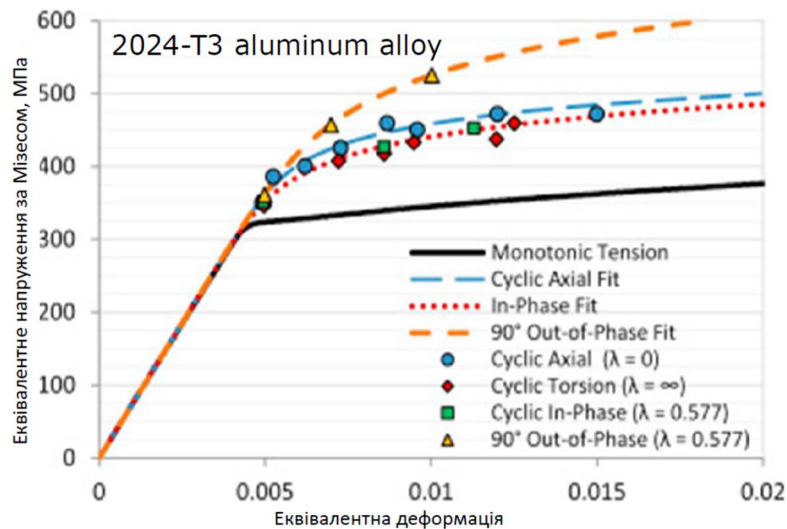


Рис. 4 Статична і циклічні діаграми деформування алюмінієвого сплаву 2024-T3 [2].

Нарешті, діаграма циклічного деформування за непропорційного навантажування (зсув фаз між лінійною деформацією і деформацією зсуву дорівнював 90°) розташована вище всіх інших діаграм. Таким чином, експерименти засвідчили наявність ефекту додаткового зміцнення для даного сплаву, що в свою чергу свідчить про чутливість матеріалу до непропорційності навантажування.

У випадку, коли після пропорційного навантажування, яке здійснювалося за одним напрямом, відбувається пропорційне навантажування у іншому напрямі, то має місце так званий **ефект поперечного зміцнення** [5]. Зміна напрямку навантажування за однакового розмаху еквівалентної деформації призводить спочатку до зміцнення, а потім до повільного знеміцнення матеріалу. Така поведінка матеріалу (аустенітна нержавіюча сталь 316 [5]) спостерігається, наприклад, після циклічного деформування розтяганням – стисканням (за еквівалентної деформації Мізеса  $e_M = 0.8\%$ ) до досягнення стабілізованого стану з наступним навантажуванням зразка знакозмінним крученням ( $\gamma_M/\sqrt{3} = 0.8\%$ , рис. 5).

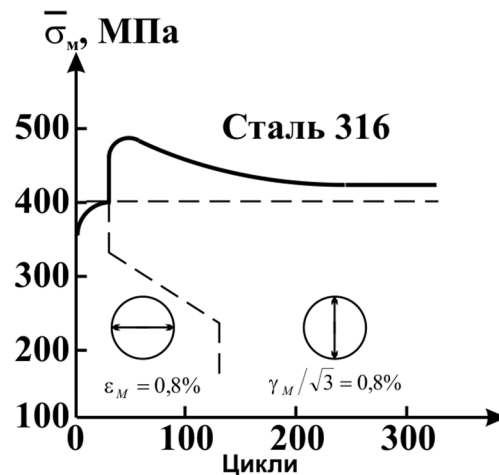


Рис. 5 Ефект поперечного зміцнення [5].

У експериментальних дослідженнях на багатовісну малоциклову втому фіксують також **ефект часткового знеміцнення**, який спостерігається за змінювання навантажування з непропорційного на пропорційне. В експериментах, пов'язаних з дослідженням цього ефекту ще не вдалося встановити до якого рівня відбувається знеміцнення матеріалу, проте можна стверджувати, що рівень зниження напруження залежить від історії навантажування. На рис. 6 зображено часткове зниження додаткового зміцнення у нержавіючої сталі 304 при переході від непропорційної траєкторії деформування до розтягання-стискання [6]. Перша стадія навантажування складалась з 30 циклів деформування осьовою силою і крутним моментом (кут зсуву фаз –  $90^\circ$ ;  $\Delta e/2 = 0,0035$  та  $\Delta \gamma/2 = 0,0035$ ). Друга стадія – з 70 циклів навантажування розтяганням-стисканням з амплітудою деформацій  $\Delta e/2 = 0,0035$ .

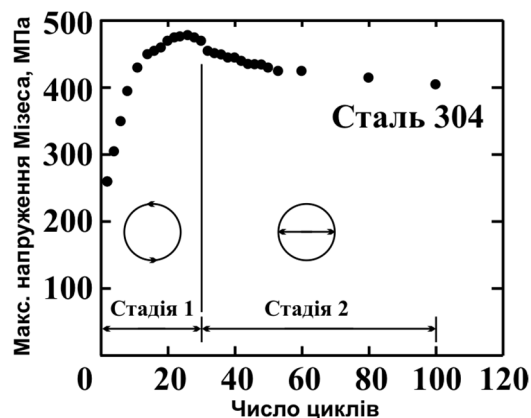


Рис. 6. Ефект часткового знеміцнення [6].

У багатьох роботах присвячених багатовісній малоцикловій втомі повідомляється, що величина додаткового зміцнення має тісний зв'язок із довговічністю матеріалів, і тому має враховуватися при оцінці довговічності в умовах непропорційного навантажування [7-10].

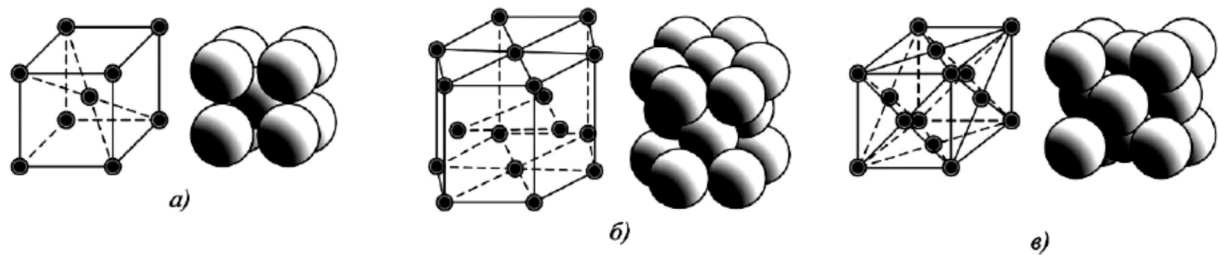


Рис. 7. Схематичне зображення деяких кристалічних решіток: а – об'ємноцентрована кубічна (ОЦК), б – гексагональна щільно упакована (ГЦУ), в – гранецентрована кубічна (ГЦК).

У деяких роботах [11-15] повідомляється, що величина додаткового зміцнення залежить від мікроструктури матеріалу. Так, для матеріалів з гранецентрованою кубічною кристалічною решіткою (ГЦК, рис. 7в) є характерним велике додаткове зміцнення і суттєве зменшення довговічності за непропорційного навантажування. Матеріали з об'ємноцентрованою кубічною решіткою (ОЦК, рис. 7а), для яких є характерним невелике додаткове зміцнення, також демонструють очевидне зменшення довговічності. У роботі [12] цілеспрямовано вивчали питання про залежність між мікроструктурою та процесом додаткового циклічного зміцнення матеріалів. Об'єктами дослідження були обрані: алюмінієвий сплав Al 1100, чиста мідь, нержавіючі сталі 304 і 310, тобто матеріали в яких під дією пропорційного навантаження розвиваються різні типи ковзання. Досліди показали, що в алюмінієвому сплаві додаткове зміцнення практично відсутнє, в той час, як для чистої міді воно становить 30%, а для нержавіючих сталей - 50%. З аналізу одержаних результатів було зроблено висновок про існування залежності між енергією дефекту упаковки (ЕДУ) матеріалу та величиною додаткового зміцнення за непропорційного

навантажування. Таким чином, експериментальні дослідження свідчать, що додаткове зміцнення тісно пов'язане з мікроструктурою матеріалів, але механізм його впливу на довговічність залишається до кінця не вивченим.

Вплив непропорційності навантажування на довговічність металевих сплавів вивчалась багатьма дослідниками [16-18]. Зокрема, на рис. 8 – 11 представлені експериментальні результати, отримані при випробуванні тонкостінних трубчастих зразків з нержавіючих сталей і титанових сплавів, які навантажувалися за різноманітними траєкторіями осьовою силою та крутним моментом з контролем за деформаціями (жорсткий режим навантажування).

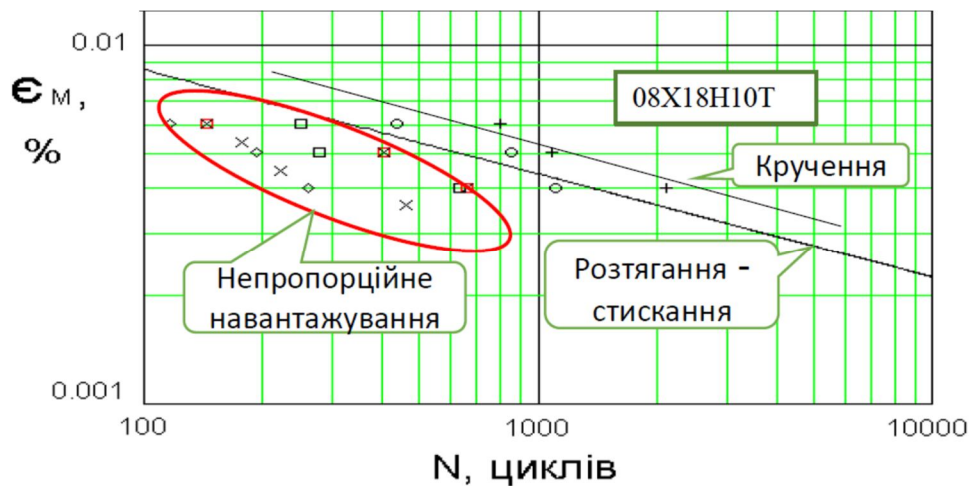


Рис. 8. Криві втоми нержавіючої сталі 08X18H10T за розтягання-стискування, кручення та непропорційного навантажування [16].

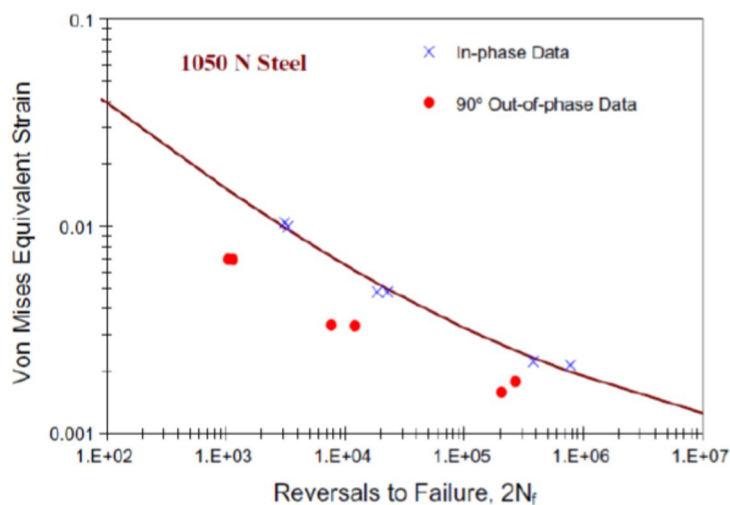


Рис. 9. Криві втоми нержавіючої сталі 1050 N за пропорційного та непропорційного навантажування [17].

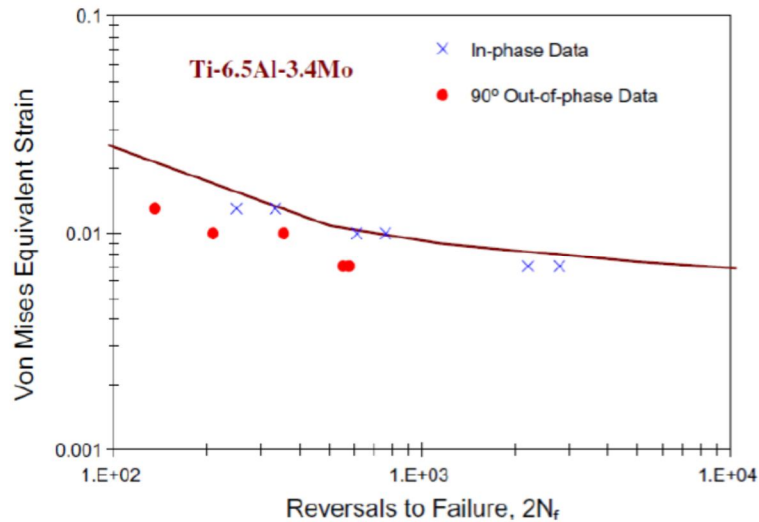


Рис. 10. Криві втоми титанового сплаву ВТ9 за розтягання-стискання, кручення та непропорційного навантажування [17].

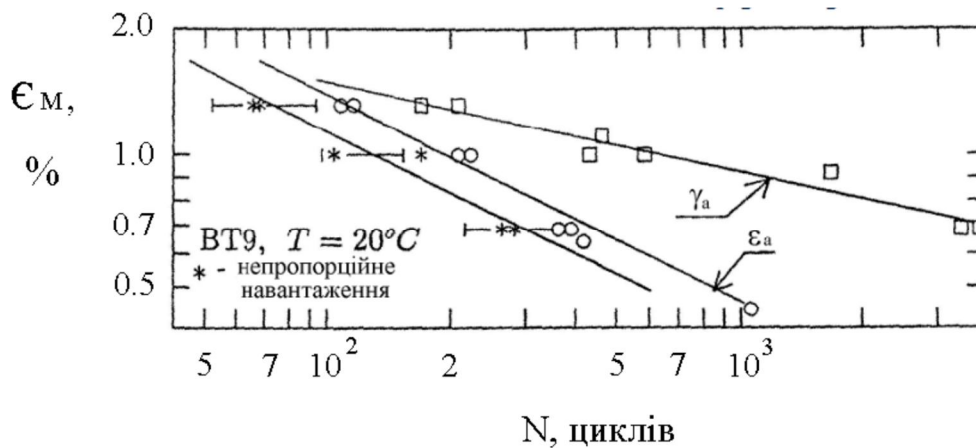


Рис. 11. Криві втоми титанового сплаву ВТ9 за розтягання-стискання, кручення та непропорційного навантажування [16].

Як бачимо в усіх випадках спостерігається зниження довговічності за непропорційних режимів навантажування. При чому для нержавіючих сталей це зниження є більш суттєвим (до десяти разів) ніж для титанових сплавів (у 2-3 рази). У роботі [18] випробувалися зразки з нержавіючої сталі 316L та міді Cu-ETP на багатовісну втому (навантажування здійснювали осьовою силою та крутним моментом) з контролем за напруженнями (м'який режим навантажування). На рис. 12. Представлені результати випробувань зразків з міді Cu-ETP, а на рис. 13 - нержавіючої сталі 316L.



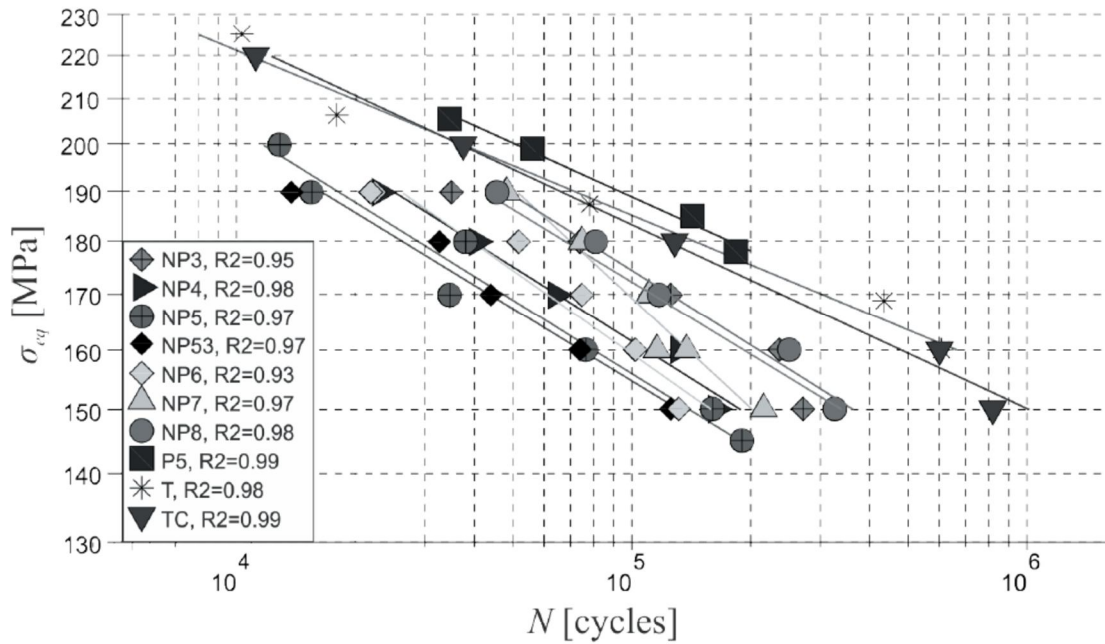


Рис. 12. Криві втоми міді Cu-ЕТР за розтягання-стискування ( $\blacktriangledown$ ), кручення (\*) та за різноманітних траєкторій непропорційного навантажування [18].

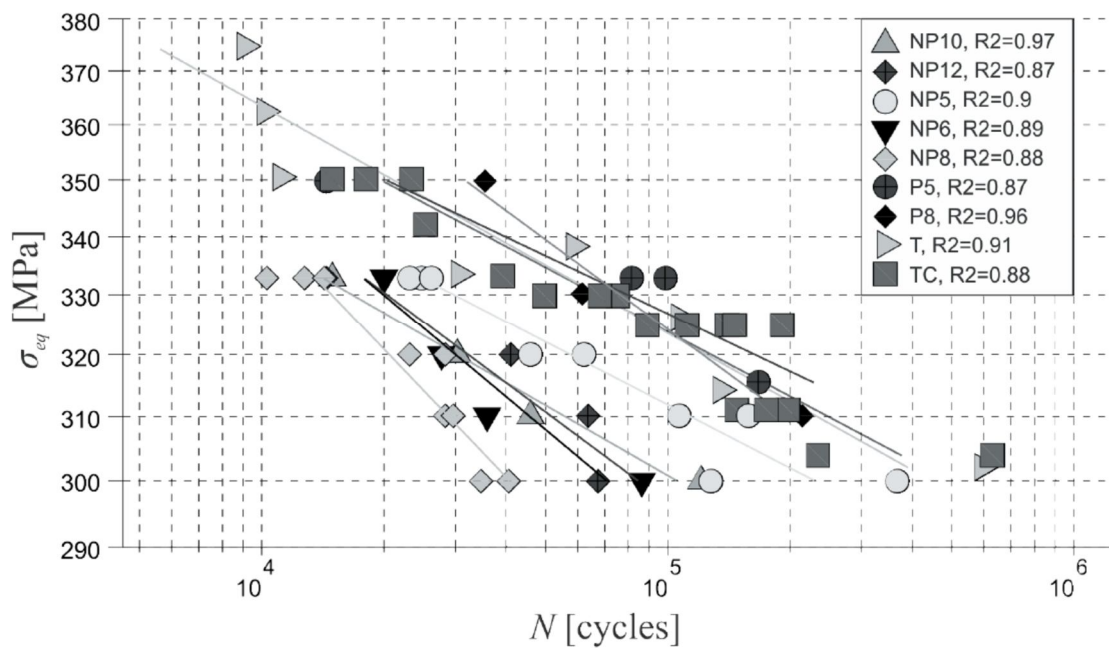


Рис. 13. Криві втоми сталі 316L за розтягання-стискування ( $\blacksquare$ ), кручення ( $\blacktriangleright$ ) та за різноманітних траєкторій непропорційного навантажування [18].

Як бачимо, для обох матеріалів у діапазоні багатоциклової втоми спостерігається суттєве зниження довговічності за непропорційного навантажування.

1.3 Критерії граничного стану за умови складного циклічного навантажування.

### 1.3.1 Силкові критерії

За багатовісного навантажування, так саме як і у разі одновісного навантажування, моделі довговічності у силівій інтерпретації використовуються, як правило, в області багатоциклової втоми без розповсюдження на квазістатичну зону.

Вплив складного напруженого стану на характеристики статичної міцності враховується за допомогою відповідних теорій міцності, які надають можливість отримати функцію зведення складного напруженого стану до еквівалентного лінійного напруженого стану, який характеризується еквівалентним напруженням  $\sigma_{\text{екв}}$ :

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, m_i) = \sigma_{\text{екв}}, \quad (1.1)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - головні напруження,  $m_i$  - параметри матеріалу.

Аналогічним чином поступають і за циклічного навантажування. Тому відомі теорії втомної міцності, як правило, є результатом узагальнення теорій статичної міцності.

Нормативні розрахунки на міцність та довговічність за малоциклового багатовісного навантажування отримали розвиток і застосування поки що лише для найбільш відповідальних конструкцій, таких наприклад, як корпуси атомних реакторів. Так у вітчизняних нормативних документах переважно використовують критерій типу Мізеса:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_{ia} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{1a} - \sigma_{3a})^2}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}, \sigma_{3a}$  - амплітуди головних напружень.

У США віддають перевагу критерію типа Треска

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_{1a} - \sigma_{3a}. \quad (1.3)$$

Проте вищезгадані критерії не враховують не лише непропорційність навантаження, а навіть вплив виду напруженого стану.

Американські дослідники Гаф і Полард [20] запропонували наступні експериментальні залежності для випадку симетричного циклу напружень:

- для сталей

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1, \quad (1.4)$$

- для чавунів

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1\right) + \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \left(2 - \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right) + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1, \quad (1.5)$$

де  $\sigma_a$ ,  $\tau_a$  - відповідно граничні амплітуди напружень згину та кручення;  $\sigma_{-1}$ ,  $\tau_{-1}$  - відповідно границі витривалості за згинання та кручення, визначені в умовах симетричного циклу навантаження.

Серенсен [20] узагальнюючи дані щодо втомного руйнування за плоского напруженого стану вважав, "що умовою міцності, яка достатньо повно охоплює втомні властивості конструкційних металів, є гіпотеза октаедричних дотичних напружень, яка, крім того, відображає вплив нормальних октаедричних напружень на міцність".

$$(\tau_{окт})_a + k(\sigma_{окт})_a = (\tau_{окт})_{-1}, \quad (1.6)$$

де коефіцієнт  $k = \sqrt{6}\tau_{-1} / \sigma_{-1} - \sqrt{2}$ ;

$(\tau_{окт})_a$  - амплітуда октаедричних дотичних напружень;

$(\sigma_{окт})_a$  - нормальне напруження, діюче на площадці, рівнонахилений до напрямів головних осей;

$(\tau_{окт})_{-1}$  - границя витривалості в октаедричних дотичних напруженнях.

Вважаючи, що настання граничного стану обумовлене здатністю матеріалу чинити опір як дотичним, так і нормальним напруженням, Г.С. Писаренко та А.А. Лебедєв [21] запропонували шукати критерії міцності у вигляді інваріантних по відношенню до напруженого стану функцій дотичних напружень та максимального напруження. В окремому випадку, автори розглянули варіант критерію, який записується у лінійній формі:

$$\tau_{окт} + m_1 \cdot \sigma_1 \leq m_2. \quad (1.7)$$

Константи матеріалу  $m_1, m_2$  можна виразити через граничні напруження  $\sigma_p, \sigma_c$  за одновісного розтягання та стискання. Враховуючи, що  $\frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{окт} = \sigma_i$ , умова (1.7) записується таким чином

$$\chi \cdot \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_1 \leq \sigma_p \quad (1.8)$$

де  $\chi = \sigma_p / \sigma_c$ .

Для матеріалів, які знаходяться у пластичному стані,  $\sigma_p = \sigma_c$ ,  $\chi = 1$  і вираз (1.8) перетворюється в рівняння теорії максимальних нормальних напружень.

Узагальнення критерію Писаренка-Лебедева на втомну міцність, дає наступне співвідношення

$$\chi' \cdot \sigma_{ia} + (1 - \chi') \cdot \sigma_{1a} \leq \sigma_{-1}, \quad (1.9)$$

де  $\sigma_{1a}$  та  $\sigma_{ia}$  - амплітудні значення максимального нормального напруження та інтенсивності напружень; константа  $\chi'$  визначається з випробувань на розтягання- стискання та знакозмінне кручення:

$$\chi' = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}. \quad (1.10)$$

У роботі [22] було запропоновано узагальнюючий критерій руйнування та пластичності ізотропних матеріалів, який збігається в окремих випадках з багатьма відомими критеріями. Спрощений варіант критерію записується так:

$$\sigma_{екв} = \lambda_0 \cdot \sigma_i + \lambda_1 \cdot \sigma_1 + \lambda_2 \cdot \sigma_2 + \lambda_3 \cdot \sigma_3 = \sigma^*, \quad (1.11)$$

де  $\sigma^*$  - критичне напруження, для втомної міцності  $\sigma^* = \sigma_{-1}$ .

В загальному випадку критерій (1.11) є чотирьохпараметричним і для визначення  $\lambda_0, \lambda_1, \dots$  необхідно провести чотири базові експерименти при різних видах напруженого стану.

Загальним недоліком вищезгаданих силових критеріїв є те, що вони не враховують історію навантаження, а деякі з них навіть вплив виду напруженого стану. При пропорційному навантажуванні досить непогані результати

демонструє критерій Писаренко-Лебедєва, але за непропорційного і його застосування є досить проблематичним.

### 1.3.2 Деформаційні критерії

Розвиток деформаційних моделей довговічності за багатовісного навантажування починався з розгляду однопараметричних моделей. Серед них найбільш поширеними є:

Теорія найбільших нормальних напружень (критерій Ренкіна):

$$\epsilon_R = \frac{1}{(1+\nu)} \left\{ \epsilon_{1a} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{1a} + \epsilon_{2a} + \epsilon_{3a}) \right\}, \quad (1.12)$$

де  $\epsilon_{1a}, \epsilon_{2a}, \epsilon_{3a}$  - амплітуди головних деформацій.

Теорія питомої енергії деформації формозміни (критерій Мізеса):

$$\epsilon_M = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \left\{ (\epsilon_{1a} - \epsilon_{2a})^2 + (\epsilon_{2a} - \epsilon_{3a})^2 + (\epsilon_{3a} - \epsilon_{1a})^2 \right\}^{1/2}. \quad (1.13)$$

Теорія найбільших дотичних напружень (критерій Треска):

$$\epsilon_T = \frac{1}{(1+\nu)} \{ \epsilon_{1a} - \epsilon_{3a} \}. \quad (1.14)$$

Існує велика кількість робіт, присвячених аналізу кореляції експериментальних даних з результатами розрахунків за цими критеріями. У ряді випадків дослідників влаштовувала отримана точність результатів, а в інших - навпаки. Статистичний аналіз здатності класичних критеріїв оцінювати довговічність в умовах малоциклового багатовісного навантажування показав, що найкращий результат не тільки в середньому, але і з точки зору мінімальної дисперсії, дає критерій інтенсивності розмаху деформацій.

У теперішній час застосування даного критерію в розрахунках на малоциклово втому за складного напруженого стану закріплено нормативними документами, наприклад, в Нормах ASME.

Але з накопичуванням експериментальних результатів, стала очевидною обмеженість даного підходу. В зв'язку з цим все більше розповсюдження набувають критерії двохпараметричні і з більшим числом параметрів.

У деформаційному вигляді двопараметричний критерій Писаренко-Лебедева приймає вид:

$$\epsilon_{\text{ПЛ}} = \chi_{\epsilon} \cdot \epsilon_M + (1 - \chi_{\epsilon}) \cdot \epsilon_R, \quad (1.15)$$

де

$$\chi_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \cdot \left[ 2(1+\nu) \left( \frac{\epsilon_{np}}{\gamma_{np}} \right) - 1 \right]. \quad (1.16)$$

У роботі Брауна та Міллера [23] була запропонована макроскопічна теорія, основана на розгляді мікромеханізмів втомного руйнування. Мікроаналіз втомних зразків показав, що смуги ковзання утворюються на кристалографічних площинах паралельних площадкам максимального зсуву і, як наслідок, пластичні деформації у смугах ковзання повинні залежати лише від деформації зсуву. Таким чином, швидкість зародження тріщини визначається величиною максимальних деформацій зсуву.

Крім того, втомна міцність металу суттєво пов'язана з його в'язкістю, яка залежить від лінійної деформації, що виникає у матеріалі біля кінчика втомної тріщини, або, більш точно, від лінійної деформації у площадці максимального зсуву, яка містить постійні смуги ковзання.

У відповідності з цим, автори зробили висновок про те, що при вивченні багатовісної втоми слід розглядати два параметри. Такими параметрами є максимальна деформація зсуву  $\gamma_{\text{max}} = \epsilon_1 - \epsilon_3$  та лінійна деформація  $\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}$  у площадці максимального зсуву.

Далі автори запропонували зображати контури постійної довговічності у вигляді так званих "Г-планів", тобто у координатах  $\gamma_{\text{max}}/2 - \epsilon_n$ . Кожний контур можна представити аналітичною залежністю

$$\gamma_{\text{max}} = f(\epsilon_n). \quad (1.17)$$

Завдяки використанню Г-планів вдалось виділити два типи розповсюдження тріщини, які було названо випадками А та В. У випадку А, що відповідає

осьовому розтяганню (чи згинанню) з крученням, тріщини мають тенденцію до розповсюдження вздовж поверхні зразка. У випадку В площини максимально напруження зсуву перетинають поверхню під кутом  $45^0$ , у результаті чого тріщини розповсюджуються від поверхні вглиб зразка.

Функції (1.17) в цих випадках відрізняються, і за однакових амплітуд деформацій втомна довговічність у випадку В виявляється меншою. Випадок В відповідає попаданню відношення деформацій  $\rho = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$  на інтервалі  $-\nu \leq \rho \leq 1$ , випадок А - відношенню  $\rho_2 = \varepsilon_3 / \varepsilon_1$  на інтервалі  $-1 \leq \rho \leq -\nu$ , де  $\nu$  - коефіцієнт Пуасона.

Для практичної реалізації теорії Брауна-Міллера необхідно у явному вигляді знати функцію (1.17), яка пов'язує максимальну деформацію зсуву  $\gamma_{max}$  з лінійною деформацією  $\varepsilon_n$  у площадці максимального зсуву. На теперішній час немає єдиного підходу по визначенню даної залежності. Наведемо деякі з запропонованих різними дослідниками видів функції (1.17).

У роботі Брауна та Міллера [23] було запропоновано для випадку А використовувати співвідношення

$$\left( \frac{\gamma_{max}}{2g} \right)^j + \left( \frac{\varepsilon_n}{h} \right)^j = 1, \quad (1.18)$$

а для випадку В критерій Треска

$$\frac{\gamma_{max}}{2g} = C, \quad (1.19)$$

де  $g, h, j, C$  - постійні параметри матеріалу, які залежать від довговічності.

Бласс та Замрик запропонували свій варіант даної залежності

$$\left( \frac{1}{2} \gamma_{max} \right)^2 = \gamma_{np}^2 - \left[ 16 \left( \frac{\gamma_{np}}{\varepsilon_{np}} \right)^2 - 36 \right] \cdot \varepsilon_{np}^2, \quad (1.20)$$

де  $\gamma_{np}$  - амплітуда деформації зсуву в умовах чистого кручення для заданої довговічності, а  $\varepsilon_{np}$  - амплітуда осьової деформації в умовах розтягу-стиску для цієї ж довговічності.

Використовуючи представлення  $\Gamma$ -площин, Макінд та Ніл [25] запропонували узагальнений критерій руйнування при багатовісній малоцикловій втомі. Автори показали, що запропоновані раніше макроскопічні критерії є окремими випадками даного критерію.

### 1.3.3 Енергетичні критерії

Критерії, що побудовані на напруженнях або деформаціях, не враховують взаємодії між напруженнями та деформаціями у процесі деформування матеріалу. Через це вони не здатні у повній мірі відобразити поведінку матеріалу від траєкторії деформування. У зв'язку з цим в умовах багатовісного, особливо непропорційного навантажування, перевагу віддають змішаним критеріям, наприклад, які використовують у якості параметру руйнування енергію на пластичних деформаціях. Енергетичні підходи достатньо широко використовуються у розрахунках на малоциклову втому, детальний аналіз цих підходів можна знайти у роботі [42].

### 1.3.4 Критерії що ґрунтуються на концепції «критичних площадок»

У даний час активно розвиваються підходи оцінювання втомної довговічності, що ґрунтуються на концепції критичних площадок. В багатьох дослідженнях продемонстровано ефективність такого підходу. Розглянемо деякі з них.

#### **Модель Брауна-Міллера**

Найпопулярніший критерій критичної площини за малоциклової втоми був запропонований Брауном та Міллером у роботах [43 -44]. Авторами була запропонована макроскопічна теорія, основана на розгляді мікромеханізмів втомного руйнування. Мікроаналіз втомних зразків показав, що смуги ковзання утворюються на кристалографічних площинах практично паралельно площадкам максимального зсуву і, як наслідок, пластичні деформації у смугах ковзання повинні залежати лише від деформації зсуву. Таким чином, швидкість зародження тріщини визначається величиною максимальних деформацій зсуву.



Крім того, втомна міцність металу суттєво пов'язана з його в'язкістю, яка залежить від номінальної деформації, що виникає в матеріалі біля кінчика втомної тріщини, чи, більш точно, від лінійної деформації на площадці максимального зсуву, яка містить постійні смуги ковзання.

У відповідності з цим, автори зробили висновок про те, що при вивченні багатовісної втоми слід розглядати два параметри: максимальну деформацію зсуву  $\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$  та лінійну деформацію  $\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$  на площадці максимального зсуву. У загальному випадку модель записується наступним чином:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + S\Delta\varepsilon_n = f_1(N) \quad (1.21)$$

де  $\Delta\varepsilon_n$  - розмах лінійної деформації, що діє на площині максимального зсуву  $\Delta\gamma_{\max}$ ,  $S$  - матеріальна константа.

Механізм втомного руйнування, який запропоновано у даній моделі, проілюстрований на рис. 1.14, а.

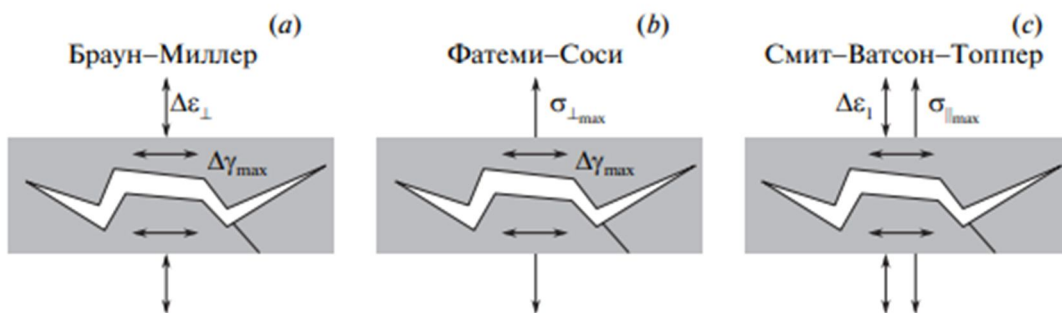


Рис. 1.14 Ілюстрація механізмів втомного руйнування. а) – модель Брауна-Міллера, б) - Фатемі-Сосі, с) - Смита-Ватсона-Топера.

Пізніше цей підхід був модифікований, і рівняння (1.21) набуло такого виду

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \alpha_{bm}\Delta\varepsilon_{\perp} = \beta_1 \frac{\sigma_c - 2\sigma_{\perp mean}}{E} (2N)^b + \beta_2 \varepsilon_c (2N)^c, \quad (1.22)$$

де  $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ ;  $\varepsilon_{ij}$  — компоненти тензора деформації;  $\Delta\gamma_{\max}/2$  — розмах максимальних деформацій зсуву, що досягаються на деякій площині;  $\Delta\varepsilon_{\perp}$  — розмах лінійних деформацій у цій площині;  $\sigma_{\perp mean}$  — середнє за цикл нормальне

напруження на цій площині. Наближені значення для коефіцієнтів визначаються з наступних формул:  $\alpha_{bm} = 0.3$ ,  $\beta_1 = (1 + \nu) + (1 - \nu)\alpha_{bm}$ ,  $\beta_1 = 1.5 + 0.5\alpha_{bm}$

### Модель Фатемі-Сосі

Модель Фатемі і Сосі [45] є розвитком моделі Брауна -Міллера, у якій нормальні деформації замінені на нормальні напруження.

Механізм втомного руйнування проілюстрований на рис. 1.14, б. У даній моделі враховується вплив напружень, нормальних до площини дії максимальних деформацій зсуву:

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left( 1 + k \frac{\sigma_{\perp max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau_c}{G} (2N)^{b_0} + \gamma_c (2N)^{c_0} \quad (1.23)$$

Тут  $\sigma_{\perp max}$  — максимальне за цикл нормальне напруження на площині, де досягається  $\gamma_{max}$ ;  $\sigma_y$  — границя текучості матеріалу;  $\tau_c$  — коефіцієнт втомної міцності (зсувної);  $\gamma_c$  — коефіцієнт втомної пластичності (зсувної);  $b_0$  і  $c_0$  — відповідні показники втомної міцності і пластичності. Наближені значення коефіцієнта  $k$  рівне  $k = 0.5$

### Модель Сміта-Ватсона-Топпера (CBT)

Сміт, Ватсон та Топпер (SWT) [46] визначили площину, на якій діють максимальні лінійні деформації, за критичну площину. Модель втомної довговічності використовує розмахи максимальної лінійної деформації та максимального нормального напруження як параметри пошкодження:

$$\frac{\Delta\epsilon_1}{2} \sigma_{\perp 1 max} = \frac{\sigma_c^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma_c \epsilon_c (2N)^{b+c} \quad (1.24)$$

де  $\Delta\epsilon_1$  — зміна максимальної головної деформації за цикл;  $\sigma_{\perp 1 max}$  — максимальне нормальне напруження на цій площині.

Механізм втомного руйнування проілюстрований на рис. 1.14, с.

Ця теорія може бути використана для аналізу як пропорційно, так і непропорційно навантажених елементів конструкцій, які руйнуються за модою I (тріщини нормального відриву).

### Модель багатовісного пошкодження Шанг-Ванга (SW)

Одна з існуючих багатовісних моделей втоми, представлена Шангом і Вангом складалася з максимального амплітуди деформації зсуву  $\gamma_{max}$  та лінійної деформації  $\varepsilon_n$  засобами критерію Мізеса:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{2} = \sqrt{\left[ (\varepsilon_n^*)^2 + \frac{(\Delta \gamma / 2)^2}{3} \right]} = f(N_f) \quad (1.25)$$

### Модель, запропонована Б.С. Лі, С. Янг, К. Хан, и Й. Лі

У роботі [47] запропонована модель багатовісної малоциклової втоми, що враховує траєкторію навантажування. Запропонована модель враховує вклад у пошкодження матеріалу чотирьох факторів: амплітуди лінійної деформації, амплітуди деформації зсуву, що діє у критичній площині, середньої гідростатичної деформації та нового фактора, що залежить від траєкторії навантажування. Вплив середньої деформації розглядається через вплив середньої гідростатичної деформації. Експериментальні дані, отримані на зразках з 11 металевих сплавів, використовувалися, для демонстрації ефективності цієї моделі як при нульовій, так і відмінній від нуля середній деформації.

#### 1.4 Висновки

Представлений аналіз пружно-пластичного деформування і втомної довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного циклічного навантажування засвідчив, що такі фактори, як напружений стан і тип траєкторії навантажування суттєво впливають на процес втомного руйнування матеріалу і мають враховуватися у розрахунках на багатовісну втому.

Аналіз критеріїв граничного стану засвідчив перевагу комплексних підходів до оцінювання втомного руйнування, які враховують фізичні процеси утворення тріщини, зокрема, моделі критичної площини Фатемі-Сосі.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету даної роботи: аналіз придатності моделі критичної площини Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів конструкцій в умовах пропорційного і непропорційного циклічного навантажування. Для визначення ефективності вказаного підходу

заплановано провести порівняльні розрахунки за критерієм Губера-Мізеса, який широко використовується у сучасних нормах розрахунку на втому.

## 2. Методика випробувань і результати випробувань титанових сплавів ВТ1-0, ВТ9 та сталі 45 в умовах багатовісного малоциклового навантажування

Для виконання даної роботи використовувалися експериментальні дані, які були отримані іншими авторами. Зокрема, використовували експериментальні дані для титанових сплавів ВТ1-0 і ВТ9, які опубліковані в роботах [48,49], та експериментальні результати отримані для конструкційної сталі Steel 45, опубліковані у роботі [50].

2.1. Методика втомних випробувань тонкостінних трубчастих зразків за пропорційного та непропорційного навантажування

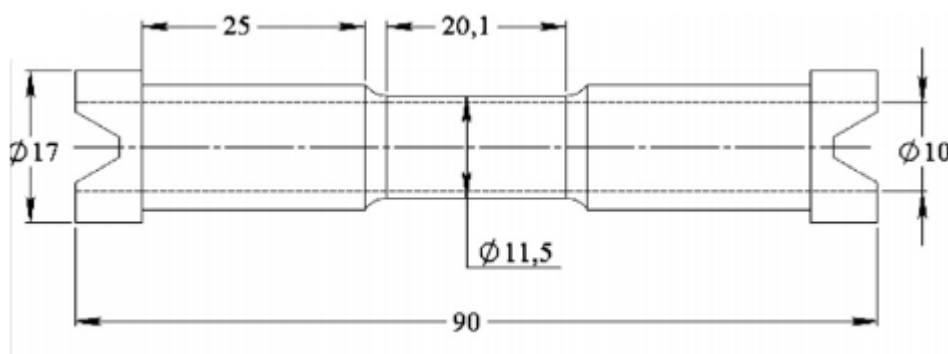


Рис. 2.1. Схема трубчатого зразка

Програмою випробувань були передбачені наступні види експериментів:

а) проведення статичних випробувань на розтягування та кручення з метою знаходження основних механічних характеристик сталі Steel 45 і титанових сплавів ВТ9, ВТ1-0;

б) випробування матеріалу на малоциклову втому в умовах лінійного напруженого стану (розтягування-стискання, кручення) та жорсткого режиму навантаження (траєкторії а та б рис. 2.2);

в) випробування матеріалу при пропорційному жорсткому малоцикловому навантаженні в умовах плоского напруженого стану (траєкторія с) ;

г) випробування матеріалу при непропорційному жорсткому малоцикловому навантаженні в умовах плоского напруженого стану (траєкторії  $d$  та  $e$ ).

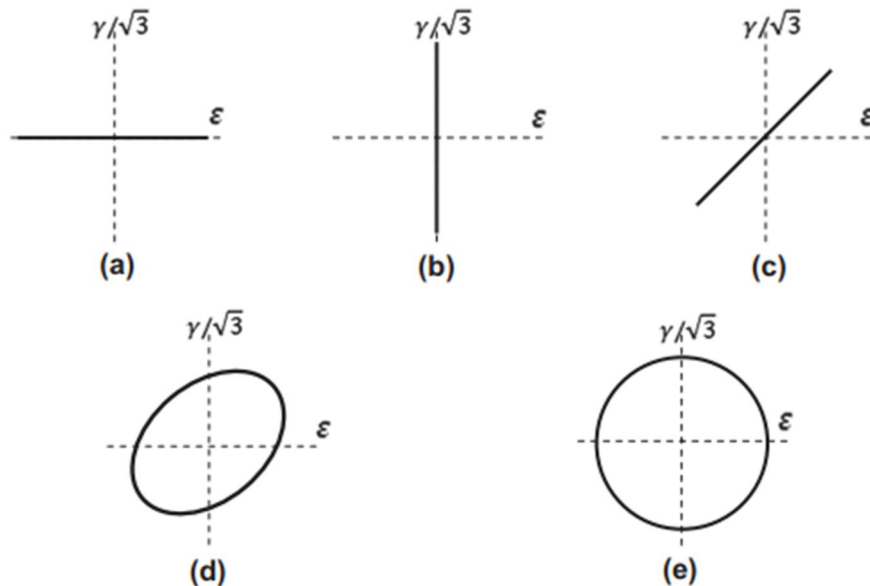


Рис. 2.2. Геометрична інтерпретація програми випробувань

Осьова деформація та деформація зсуву змінювались за синусоїдальним законом (рис. 2.3). Завдяки зміні куту зсуву фаз між цими компонентами отримувалися різні непропорційні траєкторії деформування.

Вибір жорсткого режиму випробувань базується на наступних обміркуваннях. Хоч більшість елементів конструкцій в техніці і працюють в умовах м'якого навантаження, але для розрахунків елементів конструкцій на довговічність широко використовуються критерії, де в якості основних параметрів малоциклового руйнування використовуються деформації. Це пов'язано з тим, що в зонах концентрації напружень виникають умови жорсткого навантаження навіть тоді, коли номінальні напруження поза зоною концентрації дають м'який цикл. Крім того, вимірювання деформацій можна здійснювати постійно, в той час коли напруження необхідно по цим деформаціям перераховувати. Ще одним суттєвим моментом є той факт, що при жорсткому

режимі немає накопичування деформацій, що виключає змогу квазістатичного руйнування, тобто незалежно від бази випробувань тип руйнування зразка один і той же – втомний.

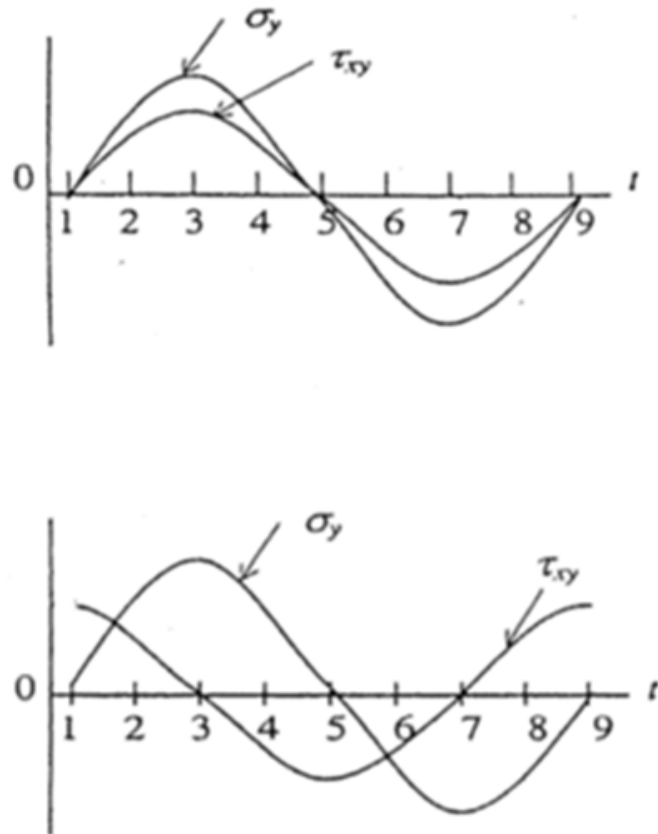


Рис. 2.4. Діаграми осьових і тангенціальних напружень при (1) пропорційному та (2) непропорційному навантаженні

Найважливішими параметрами, що характеризують ступінь впливу зовнішнього малоциклового навантажування на пошкоджуваність, є розмах пружно-пластичної, пластичної деформації в циклі, односторонньо накопичена деформація, тривалість циклів навантажування, а також сумарна тривалість процесу (число циклів або час). Крім того, суттєву роль відіграє зміна деформаційних властивостей матеріалу, що характеризуються деформаціями (односторонньо накопиченими чи циклічними), які може витримати матеріал до руйнування (утворення макротріщини).

Результати випробувань титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 на малоциклову втому при розтяганні-стисканні та знакозмінному крученні дали змогу отримати параметри рівнянь довговічності Кофіна–Менсона, які записуються так:

– для випадку розтягання-стискання

$$\varepsilon_a^t = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (2.1)$$

– для випадку знакозмінного кручення

$$\gamma_a^t = \gamma_a^e + \gamma_a^p = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}. \quad (2.2)$$

Значення параметрів рівнянь (2.1) та (2.2) визначалися методом найменших квадратів і наведені в таблицях 2..

За результатами випробувань зразків з титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 на розтягання-стискання та знакозмінне кручення побудовано криві втоми в малоцикловій області для досліджуваних матеріалів, які відповідають ймовірності руйнування 50 % (рис. 2.5, 2.6).

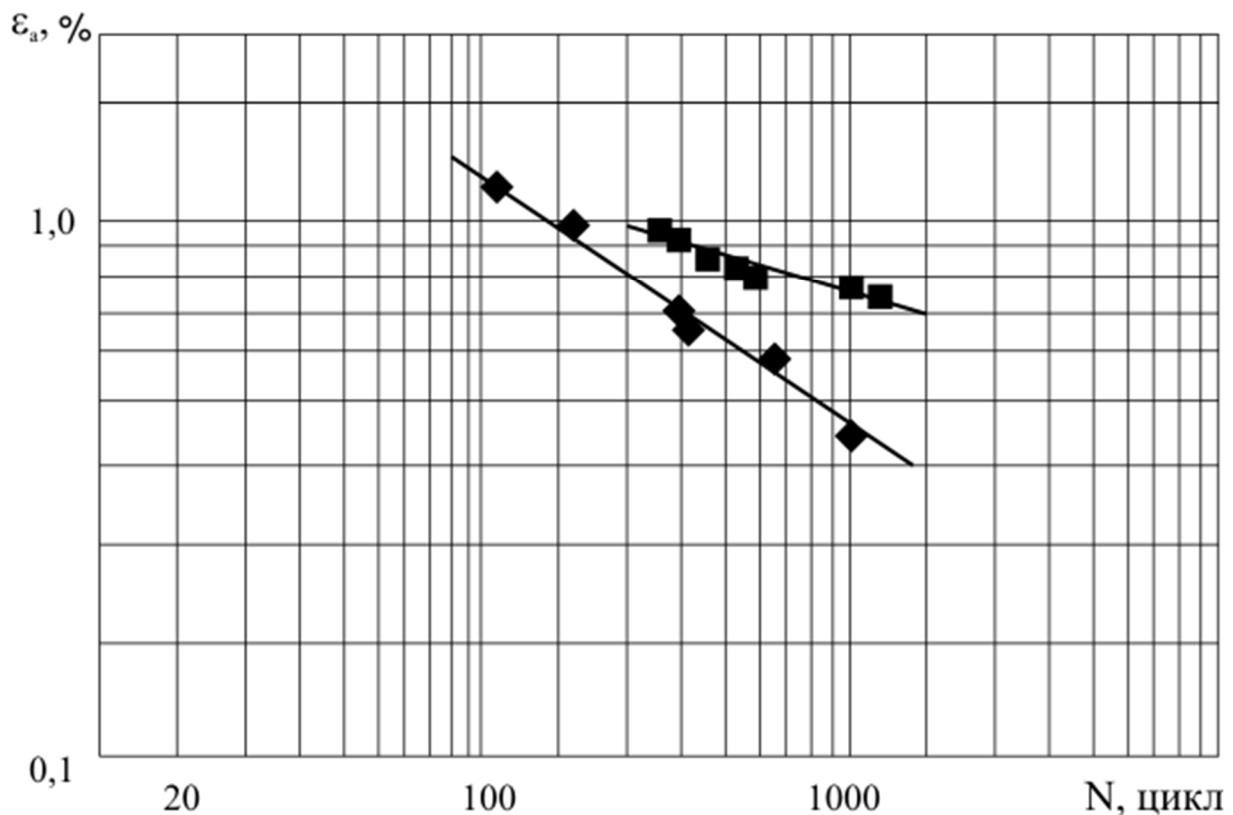


Рис. 2.5 - Криві малоциклової втоми титанових сплавів при розтяганні-стисканні (ВТ9 – ; ВТ1-0 – )



Як видно з рис. 2.5, крива малоциклової втоми титанового сплаву ВТ9 при розтяганні-стисканні лежить нижче відповідної кривої для ВТ1-0. Аналіз отриманих кривих показує, що титановий сплав ВТ1-0 має більшу циклічну довговічність при розтяганні-стисканні у жорсткому режимі навантажування, ніж титановий сплав ВТ9. Це пов'язано з тим, що введення легуючих елементів в титановий сплав ВТ9 знизило його характеристики пластичності  $\delta$  і  $\psi$  у порівнянні з технічно чистим титаном ВТ1-0. З іншого боку було підвищено характеристики його статичної ( $\sigma_B$  та  $\sigma_{0.2}$ ) і циклічної ( $\sigma'_f$ ) міцності.

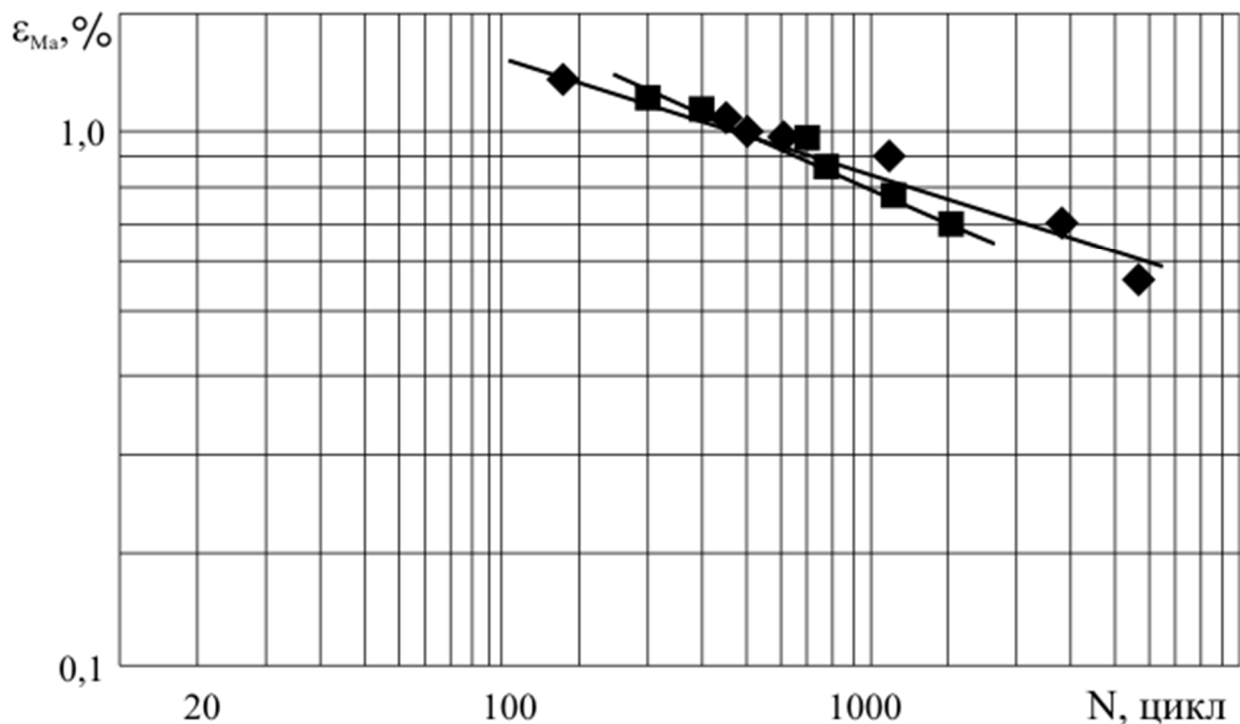


Рис. 2.6 - Криві малоциклової втоми титанових сплавів при крученні  
(ВТ9 — ; ВТ1-0 — )

З рис. 2.6 видно, що крива малоциклової втоми титанового сплаву ВТ9 при знакозмінному крученні лежить вище відповідної кривої для ВТ1-0. Тобто циклічна довговічність титанового сплаву ВТ9 при знакозмінному крученні у жорсткому режимі навантажування вища, ніж циклічна довговічність ВТ1-0 за

даних умов. Титановий сплав ВТ9 характеризується також підвищеними характеристиками статичної ( $\tau_{0,3}$ ) та циклічної ( $\tau'_f$ ) міцності.

В результаті випробувань титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 на розтягання-стискання та знакозмінне кручення були отримані відповідні діаграми циклічного пружно-пластичного деформування (рис. 2.7а, 2.7б; рис. 2.8а, 2.8б).

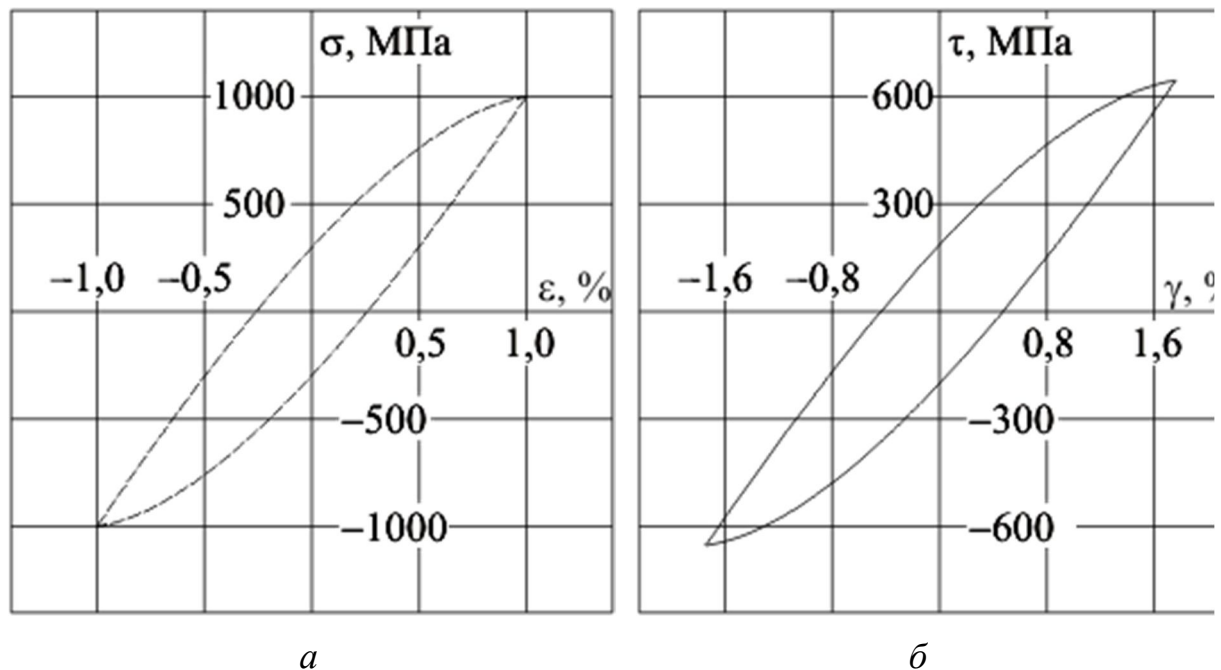


Рис. 2.7. Циклічні діаграми деформування титанового сплаву ВТ9  
(— — — розтягання-стискання, ———— знакозмінне кручення)

Стабілізація циклічних діаграм деформування в усіх випадках відбувалася після 5...10 циклів. У зв'язку з цим для описання діаграм циклічного пружно-пластичного деформування використовували діаграму Морроу. Дана діаграма циклічного деформування являє собою криву, що проходить через вершини петель гістерезису і в межах пружності співпадає з лінійною ділянкою діаграми статичного деформування.

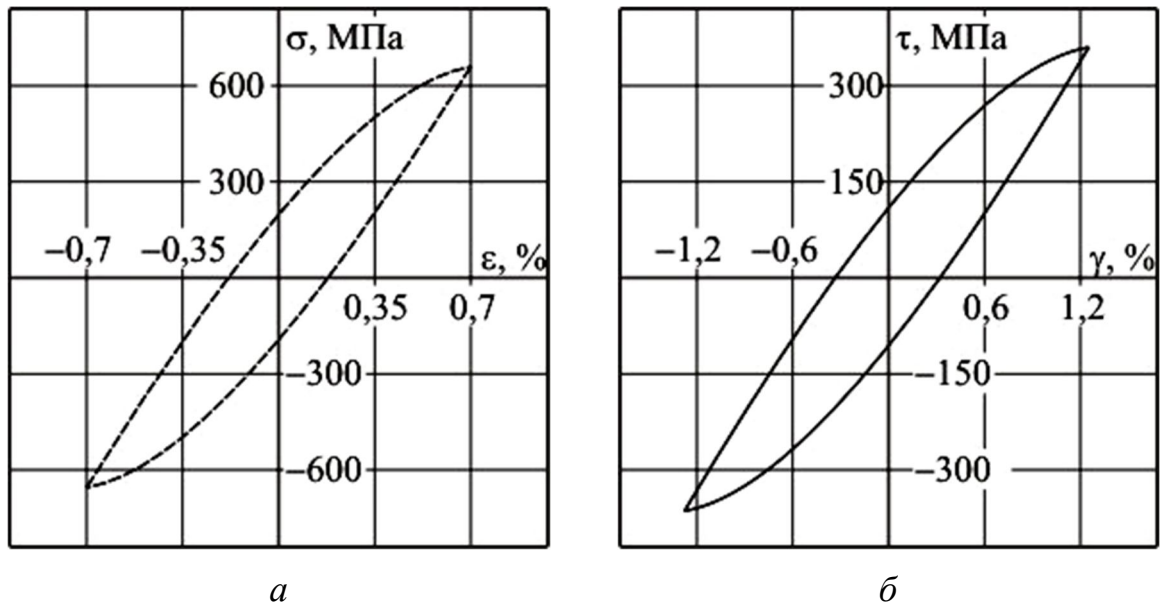


Рис. 2.8. Циклічні діаграми деформування титанового сплаву ВТ1-0  
(- - - - розтягання-стискання, ——— знакозмінне кручення)

Аналітично діаграма Морроу для випадку розтягання-стискання описувалася наступними залежностями:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} \text{ при } \sigma_a \leq \sigma_{ny},$$

$$\epsilon_a = \epsilon_a^e + \epsilon_a^p = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ при } \sigma_a \geq \sigma_{ny}.$$

Сталі матеріалу  $K$  та  $n$  відповідно дорівнюють 1961 МПа та 0,123 для ВТ9 і 2515 МПа та 0,315 для ВТ1-0.

Для описання петель циклічного пружно-пластичного деформування при знакозмінному крученні також використовувалась діаграма Морроу, яка описується наступними рівняннями:

$$\gamma_a = \frac{\tau_a}{G} \text{ при } \tau_a \leq \tau_{ny},$$

$$\gamma_a = \gamma_a^e + \gamma_a^p = \frac{\tau_a}{G} + \left( \frac{\tau_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \text{ при } \tau_a \geq \tau_{ny}.$$

Сталі матеріалу  $K'$  та  $n'$  відповідно дорівнюють 1052 МПа та 0,144 для ВТ9 і 720,6 МПа та 0,194 для ВТ1-0.

Для дослідження характеристик непропорційного навантажування сплавів ВТ9 та ВТ1-0 було виконано випробування за коловою траєкторією, яка утворюється в циклі при зсуві фаз між осьовою деформацією та деформацією зсуву на  $90^\circ$ :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a \cdot \sin(\omega t), \quad (2.3a)$$

$$\gamma(t) = \gamma_a \cdot \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (2.3b)$$

де  $\omega$  – кутова частота.

У якості параметру, що характеризує рівень деформацій, використано максимальне значення інтенсивності амплітуди повної деформації в циклі:

$$\varepsilon_a = \sqrt{(\varepsilon^2 + 1/3\gamma^2)_{\max}}, \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  – поточні значення осьової і кутової деформації відповідно.

Порівняння кривих втоми (рис. 2.9, 2.10) при простих та складних траєкторіях деформування вказує на те, що при непропорційному навантажуванні має місце падіння довговічності у порівнянні з пропорційним навантажуванням (розтяганням-стисканням та знакозмінним крученням).

У порівнянні з розтяганням-стисканням довговічність за коловою траєкторією знижується в 1,5 – 2,5 рази для обох матеріалів в залежності від рівня інтенсивності амплітуди повної деформації (2.4), а в порівнянні зі знакозмінним крученням, крива якого лежить найвище, у 3,5 рази для ВТ1-0 та до 10 разів для ВТ9.

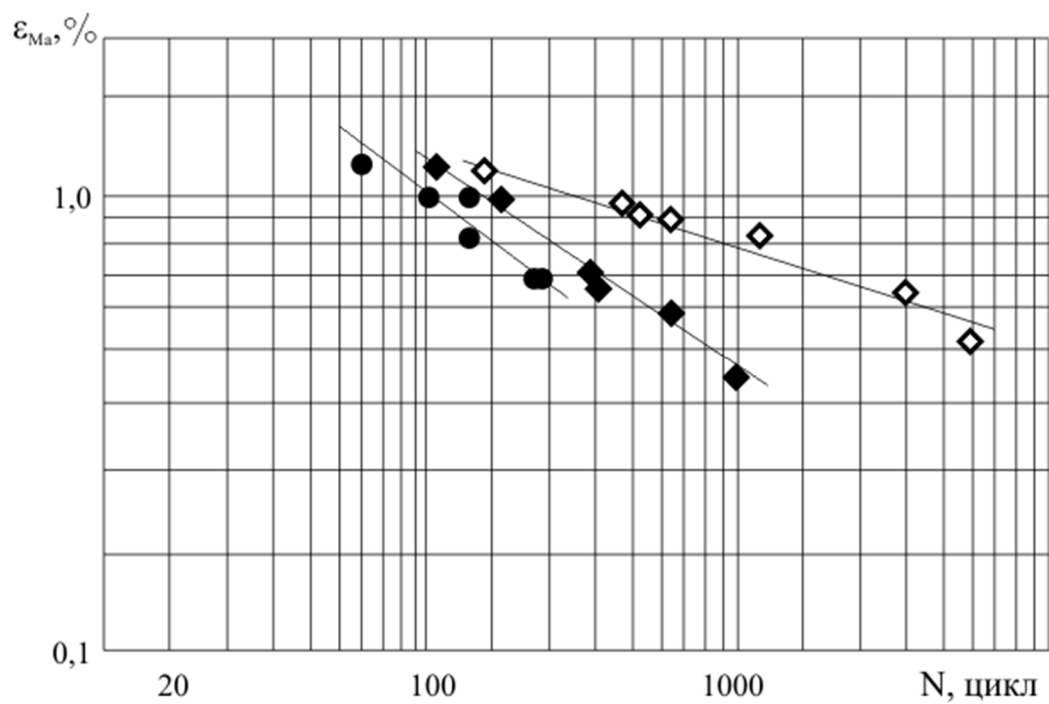


Рис. 2.9. Криві малоциклової втоми титанового сплаву ВТ9 (непропорційне деформування; —●—; розтягання-стискання —◆—; знакозмінне кручення —◇—)

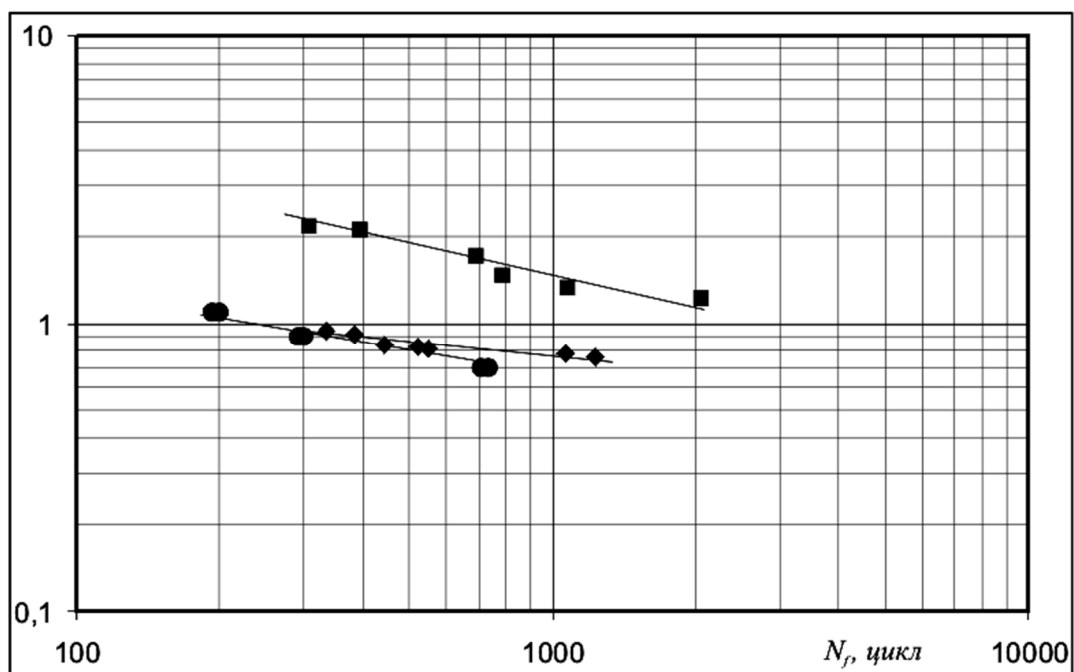


Рис. 2.10. Криві малоциклової втоми титанового сплаву ВТ1-0 (непропорційне деформування; —●—; розтягання-стискання —◆—; знакозмінне кручення —◇—)

Таким чином, отримані результати свідчать про те, що довговічність титанових сплавів суттєво залежить від виду напруженого стану, який реалізується у робочій частині зразка (лінійний – при одновісному розтягненні-стисканні, плоский – при знакозмінному крученні), і відповідно, від траєкторії деформування.

Як відзначалося раніше при непропорційному навантажуванні металів та сплавів виявляються властивості, які є нетиповими для пропорційного навантажування. Так, на рис. 2.11 та 2.12 зображено стабілізовані петлі пружно-пластичного гістерезису сплавів ВТ9 та ВТ1-0, які отримано з випробувань за непропорційною траєкторією (колова траєкторія) і, відповідно, при розтягненні-стисканні та знакозмінному крученні для однакової інтенсивності амплітуд повної деформації.

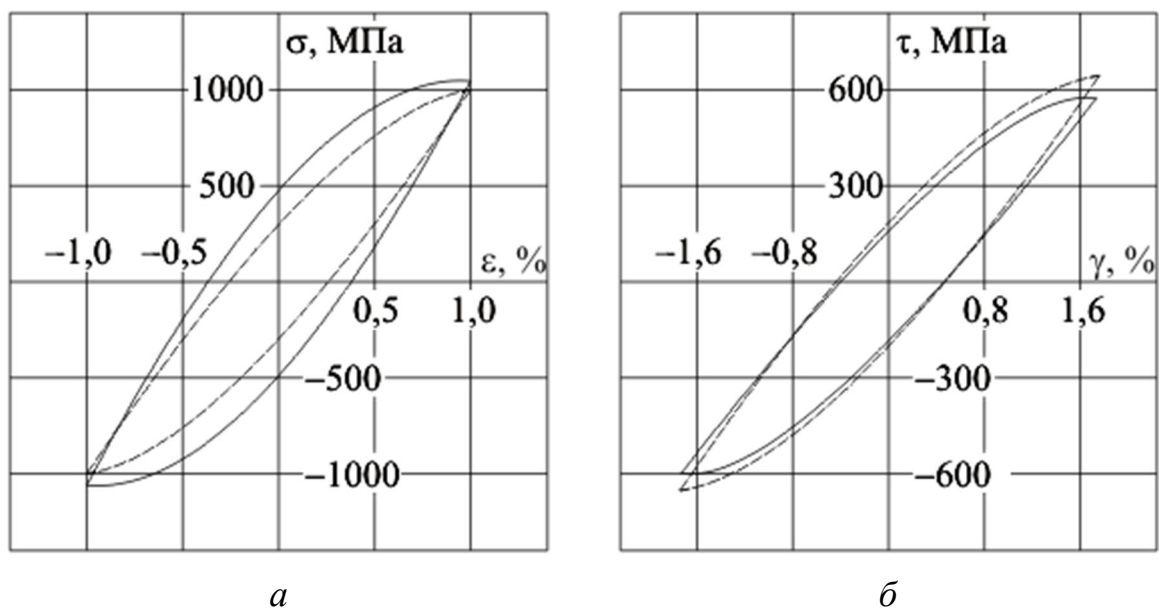


Рис. 2.11. Циклічні діаграми деформування титанового сплаву ВТ9  
(— непропорційне навантажування, --- пропорційне навантажування)

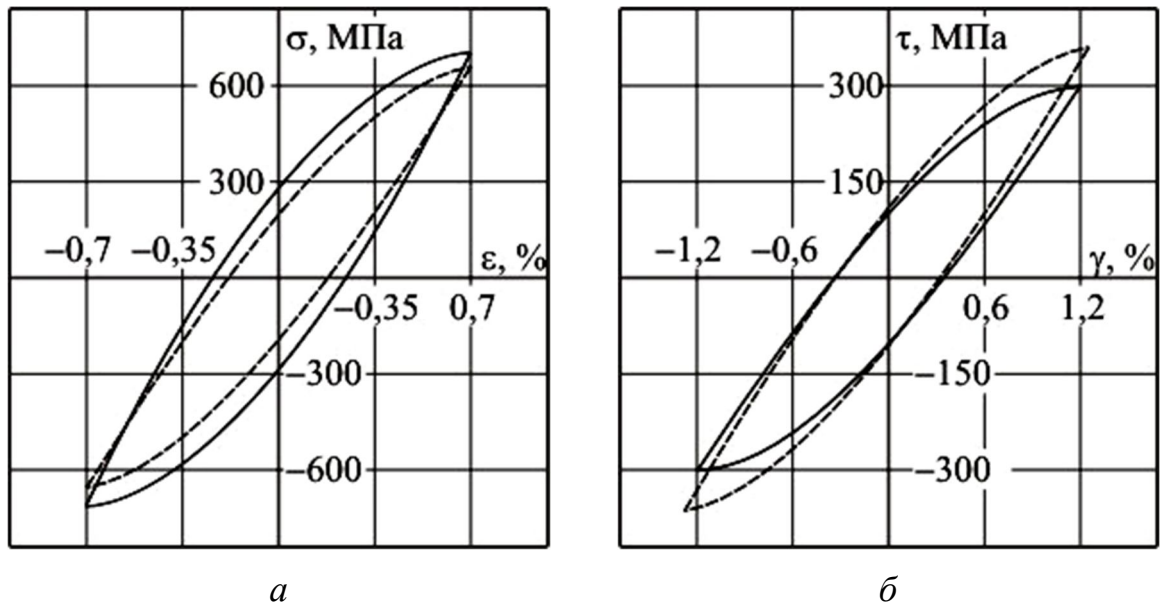


Рис. 2.12. Циклічні діаграми деформування титанового сплаву ВТ1-0  
(— непропорційне навантажування, --- пропорційне)

Як видно з рисунків 2.11а та 2.11б, перехід від пропорційного навантажування до непропорційного призводить до зміни форми та розмірів петель пластичного гістерезису.

Треба відмітити, що зміни, які мають місце для циклічних діаграм осьового навантажування і діаграм кручення, є різними. На діаграмах осьового навантажування непропорційне деформування призводить до значного (приблизно в 2 рази для ВТ9 та в 1,5 рази для ВТ1-0) збільшення пластичної складової амплітуди осьової деформації і, як наслідок, до збільшення роботи на пластичних деформаціях. Пластична складова амплітуди деформації зсуву при непропорційному навантажуванні у порівнянні з чистим крученням для обох сплавів ВТ9 та ВТ1-0 практично не змінюється.

На відміну від відомих випробувань [11], проведених на нержавіючих сталях, при випробуваннях титанових сплавів ВТ9 та ВТ1-0 не спостерігалось ефекту „додаткового зміцнення”, тобто збільшення амплітуд еквівалентних напружень при непропорційному навантажуванні у порівнянні з пропорційним.

2.2 Механічні та циклічні характеристики титанового сплаву BT1-0. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.

Комерційно доступний сплав BT1 – 0, що є технічно чистим титаном. Особлива цінність титану полягає в його високій корозійній стійкості та великій питомій міцності (відношення міцності до густини). У зв'язку з цим даний матеріал широко використовується в хімічному апаратобудівництві, авіобудуванні та ракетобудуванні.

Хімічний склад BT 1-0 представлений у Таблиці 2.1

Таблиця 2.1.

<i>Матеріал</i>	<i>Al, %</i>	<i>Si, %</i>	<i>Fe, %</i>	<i>Ti, %</i>
BT1 – 0	0,45	0,01	0,02	<i>ОСНОВА</i>

Цілісні бруски діаметром 25 мм і довжиною 100 мм були оброблені до твердих зразків діаметром 4 мм та 19 мм довжина калібру, яка буде використовуватися для монотонних і осьових циклічних випробувань з постійною амплітудою. Ці ж бруски також обробляли до трубчастих зразків конфігурацій та розмірів, показаних на рис. 2.5, з Товщина стінки 0,75 мм, внутрішній діаметр 10 мм і довжина калібру 20 мм. Оскільки розмір зерен, становить менше 15 мкм, є принаймні 50 зерен по всій товщині трубчастого зразка. Трубчасті зразки були використані для крутильних, фазової та позафазної аксіально-крутильної константи амплітудні випробування, а також для експериментів з втомою блоку навантажень. Зразок був розроблений на основі Державного стандарту України

Рівномірну товщину трубчастих зразків досліджували в п'яти точках в поздовжньому напрямку та в чотирьох точках в окружному напрямку. У цьому дослідженні використовувались лише зразки з точністю до 0,03 мм. Внутрішня частина трубчастих зразків була шліфований і зовнішній переріз як суцільний, так і трубчастий тонкостінні зразки були ретельно відполіровані до поверхні,



близької до дзеркальної. Поліровані поверхні ретельно досліджували, щоб забезпечити повне видалення знаків обробки в межах секції калібру.

Постійно обернені синусоїдальні осьові, крутильні, фазові, з зсувом фаз у  $45^0$  та  $90^0$  сигналів застосовувались для постійних амплітудних випробувань, з деформаційними шляхами, показаними на рис. 2.2 Різні комбінації повністю обернених осьових, крутильних та з зсувом фази на  $90^0$  осьово-крутильні синусоїдальні деформаційні шляхи проводились на чистому титановому сплаві ВТ 1-0 трубчастих тонкостінних зразків у вигляді набору повторювані блоків із заданою кількістю розворотів та значеннями деформацій.

Рис 2.5 Блоки навантаження, що складаються з різних комбінацій осьових, крутильних та з зсувом  $90^0$  осьово-крутильних деформаційних шляхів.

Основні механічні характеристики сплаву ВТ1-0, де для порівняння наведено дані, одержані на суцільних зразках наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Механічні характеристики	BT 1 – 0
Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	112
Модуль зсуву $G, \text{ГПа}$	40
Границя текучості $\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	475
Границя міцності $\sigma_b, \text{МПа}$	558
Відносне видовження $\delta, \%$	26
Відносне звуження $\psi, \%$	57
Коефіцієнт Пуасона $\nu$	0,35

Таблиця 2.3

Механічні характеристики	BT 1 – 0
Константи рівняння Кофіна – Менсона	$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$
$\sigma'_f, \text{МПа}$	647
$\varepsilon'_f$	0,548
$b$	-0,033
$c$	-0,646
	$\frac{\Delta \gamma}{2} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}$
$\tau'_f, \text{МПа}$	485
$\gamma'_f$	0,417
$b_0$	-0,069
$c_0$	-0,523

Таблиця 2.4. Дані експерименту на багатоциклову втому ВТ 1-0

№ зразка	$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\varphi$	N, циклів
03	1,9	0	0	124
24	1,6	0	0	262
64	1,3	0	0	598
07	1,0	0	0	1920
63	0,7	0	0	9780
05	0	2,25	0	348
66	0	2,25	0	408
22	0	1,73	0	822
65	0	1,95	0	898
06	0	1,73	0	1168
70	0	1,58	0	3476
41	0	1,21	0	7090
69	0	1,21	0	8000
68	0,92	1,59	0	250
08	0,92	1,59	0	334
11	0,71	1,22	0	614
45	0,71	1,22	0	760
12	0,49	0,85	0	2202
67	0,49	0,85	0	2786
09	1,3	2,25	90	136
40	1,3	2,25	90	136
71	1,0	1,73	90	210
14	1,0	1,73	90	356
44	0,7	1,21	90	554
19	0,7	1,21	90	580

2.3 Механічні та циклічні характеристики титанового сплаву ВТ9. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.

Жароміцний титановий сплав ВТ9 системи  $Ti - Al - Mo - Zr - Si$  відноситься до двофазних ( $\alpha + \beta$ )-сплавів мартенситного класу. Хімічний склад матеріалу зазначений у таблиці 2.5. [48],

Хімічний склад ВТ9 представлений у Таблиці 2.3

Таблиця 2.5

Матеріал	Al, %	Si, %	Fe, %	C, %	N, %	Zr, %	H, %	Ti, %
ВТ-9	6.5	0.3	0.081	0.06	0.018	1.58	0.006	ОСНОВА

Цілісні бруски діаметром 25 мм і довжиною 100 мм були оброблені до твердих зразків діаметром 4 мм та 19 мм довжина калібру, яка буде використовуватися для монотонних і осьових циклічних випробувань з постійною амплітудою. Ці ж бруски також обробляли до трубчастих зразків конфігурацій та розмірів, показаних на рис. 2.5, з Товщина стінки 0,75 мм, внутрішній діаметр 10 мм і довжина калібру 20 мм. Оскільки розмір зерен, становить менше 15 мкм, є принаймні 50 зерен по всій товщині трубчастого зразка. Трубчасті зразки були використані для крутильних, фазової та позафазної аксіально-крутильної константи амплітудні випробування, а також для експериментів з втомою блоку навантажень. Зразок був розроблений на основі Державного стандарту України

Рівномірну товщину трубчастих зразків досліджували в п'яти точках в поздовжньому напрямку та в чотирьох точках в окружному напрямку. У цьому дослідженні використовувались лише зразки з точністю до 0,03 мм. Внутрішня

частина трубчастих зразків була шліфований і зовнішній переріз як суцільний, так і трубчастий тонкостінні зразки були ретельно відполіровані до поверхні, близької до дзеркальної. Поліровані поверхні ретельно досліджували, щоб забезпечити повне видалення знаків обробки в межах секції калібру.

Постійно обернені синусоїдальні осьові, крутильні, фазові, з зсувом фаз у  $45^0$  та  $90^0$  сигналів застосовувались для постійних амплітудних випробувань, з деформаційними шляхами, показаними на рис. 2.2

Основні механічні характеристики сплаву ВТ9, де для порівняння наведено дані, одержані на суцільних зразках наведено в таблиці 2.6

Експериментальні дані, що використовуватимуться у наступних розрахунках наведено у таблиці 2.11

Таблиця 2.6

Механічні характеристики	ВТ9
Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	118
Модуль зсуву $G, \text{ГПа}$	43
Границя текучості $\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	910
Границя міцності $\sigma_b, \text{МПа}$	1080
Відносне видовження $\delta, \%$	17
Відносне звуження $\psi, \%$	45
Коефіцієнт Пуасона $\nu$	0,35

Таблиця 2.7

Механічні характеристики	ВТ9
Константи рівняння Кофіна – Менсона	$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$
$\sigma'_f, \text{МПа}$	1180
$\varepsilon'_f$	0,278
$b$	-0,025
$c$	-0,665
	$\frac{\Delta \gamma}{2} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}$
$\tau'_f, \text{МПа}$	881
$\gamma'_f$	0,180
$b_0$	-0,082
$c_0$	-0,470

Таблиця 2.8. Дані експерименту на багатоциклову втому ВТ9

№ зразка	$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\Phi$	N, циклів
03	1,68	0	0	300
24	1,15	0	0	830
64	1,07	0	0	1562
07	0,83	0	0	2140
63	0,61	0	0	6430
05	0	1,91	0	882
66	0	1,91	0	940
22	0	1,56	0	1820
65	0	1,56	0	1906
06	0	1,21	0	4090
70	0	1,21	0	4200

41	0,78	1,34	0	620
69	0,78	1,34	0	632
68	0,78	1,34	0	630
08	0,59	1,03	0	2062
11	0,55	0,75	0	3008
45	0,55	0,75	0	3160
12	0,82	1,07	0	904
67	0,78	1,00	0	1000
09	0,72	0,94	0	1606
40	0,72	0,94	0	1644
71	0,72	0,94	0	1840
14	0,87	1,50	45	400
44	0,87	1,50	45	422
19	0,71	1,23	45	736
54	0,71	1,23	45	744
63	0,53	0,95	45	1780
12	0,53	0,95	45	1862
77	1,10	1,91	90	384
86	1,10	1,91	90	398
43	0,90	1,56	90	586
15	0,90	1,56	90	602
17	0,70	1,21	90	1420
59	0,70	1,21	90	1466

2.4 Механічні та циклічні характеристики сталі 45. Результати втомних випробувань за умов пропорційного та непропорційного навантажування.

Гарячекатана сталь 45 (діаметр 60 мм) у нормованому стані було використано у досліді. Характеристики матеріалу при кімнатній температурі границя текучості — 370 МПа, границя міцності — 610 МПа, і подовження 26,36%.

Всі випробування проводились на MTS809-250 KN. Установка, яка була автоматизована для контролю випробування та збору даних. Тонкостінні трубчасті зразки з рівномірною довжиною виїмки 50 мм, зовні діаметром 25 мм і внутрішнім діаметром 21 мм використовується у цьому випробуванні. Деформацію вимірювали на MTS632.68C-01 екстензометрі. Всі тести проводились під контролем амплітуди загальної деформації з використанням синусоїдальна форми хвилі при постійній циклічній частоті 0,08 Гц.

Перш за все, три зразки використовували для розтягування-кручення тести на циклічні напруження-деформація при пропорційному,  $45^0$ ). еліптичний непропорційний, і коло - непропорційний навантаження, відповідно. Ці тести були повністю оберненими циклічними завантаження. Загальна амплітуда деформації була досягнута за допомогою регулювання трьох зразків для трьох шляхів завантаження на п'яти рівнях деформаційного навантаження, тобто 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% та 1,0%. Циклічне навантаження для кожного рівня деформації продовжувалось близько 40 циклів, що змушує матеріал досягати циклічної стабілізації. Параметри завантаження показані в Таблиці !!! . Далі, контрольований деформацією багатовісне малоциклове випробування на втому проводили при кімнатній температурі при синусоїдальній формі хвилі деформації. Співвідношення деформацій змінювалося від нуля до нескінченності.

Основні механічні характеристики сталі Steel 45, де для порівняння наведено дані, одержані на суцільних зразках наведено в таблиці 2.9



Експериментальні дані, що використовуватимуться у наступних розрахунках наведено у таблиці 2.11

Таблиця 2.9

Механічні характеристики	Steel 45
Константи рівняння Кофіна – Менсона	$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$
$\sigma'_f, \text{МПа}$	843
$\varepsilon'_f$	0,3269
$b$	-0,1047
$c$	-0,5458
	$\frac{\Delta \gamma}{2} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0}$
$\tau'_f, \text{МПа}$	559
$\gamma'_f$	0.496
$b_0$	-0,1078
$c_0$	-0,469

Таблиця 2.10

Механічні характеристики	Steel 45
Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	190
Модуль зсуву $G, \text{ГПа}$	79
Границя текучості $\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	310
Границя міцності $\sigma_b, \text{МПа}$	415
Коефіцієнт Пуасона $\nu$	0,3

Таблиця 2.11. Дані експерименту на багатоциклову втому сталі 45

№ зразка	$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\Phi$	N, циклів
36	0.	1.039	0	3715
19	0	1.386	0	1671
33	0.566	0.979	0	1085
27	0.566	0.979	0	1279
34	0,800	0.693	90	448
38	0.800	0.693	90	440
10	0.800	0.693	90	450
5	0.400	1.386	90	622
1	0.400	1.386	90	560
12	0.400	1,386	90	670
21	0.400	1.386	90	650
9	0,566	0.979	45	681
4	0,800	1.386	45	278
6	0,566	0.979	45	664
20	0,566	0.979	60	544
8	0,800	1.386	90	384
16	0,800	1.386	90	426
23	0,800	1.386	90	406
22	0,800	1.386	90	455
2	0,480	0	0	3881
3	0,590	0	0	2830
7	0,690	0	0	1962

## 2.5 Висновки

У другому розділі представлені основні складові експерименту, що був використаний у роботі, до яких відносяться: програма випробувань, експериментальне обладнання, методики випробувань та обробки даних.

У відповідності до програм випробувань, представлені результати дослідження поведінки матеріалів в умовах багатовісного пропорційного і непропорційного навантажування, та визначення параметрів, що традиційно входять до рівнянь граничного стану.

Випробування виконувалися на тонкостінних трубчатих зразках в умовах одночасної дії осьової сили та крутного моменту.

### **3. Порівняльний аналіз розрахунків за критеріями Губера-Мізеса і Фатемі-Сосі з експериментальними результатами**

При аналізі існуючих підходів до опису кривих багатоциклової втоми в умовах багатовісного навантаження було показано, що основним підходом при розробці критеріїв міцності є концепція еквівалентних параметрів, відповідно до якої складний напружений стан приводиться до еквівалентного одноосового напруженого стану.

Також був зроблений висновок про те, що в незалежності від того, які параметри використовуються в якості еквівалентних (деформація, напруження, енергія), відомі умови граничного стану можна класифікувати за кількістю постійних матеріалу, обумовлених експериментально. Зі збільшенням числа постійних, як правило, підвищується точність запропонованих моделей, але для їх визначення необхідно отримати результати експериментів при різних видах напруженого стану, що збільшує трудомісткість і обсяг іспитів. У зв'язку з цим актуальною є задача визначення оптимальної кількості констант матеріалу і базовий експеримент для різних видів багатовісного навантаження.

З метою оптимізації кількості постійних матеріалу при визначенні граничного стану в умовах двохосового багатоциклового навантаження, було проведено порівняння отриманих з розрахунків та експериментальних результатів по одно - та двохпараметричним критеріям.

#### **3.1 Механічні Методика оцінювання довговічності металевих сплавів за критеріями Губера-Мізеса і Фатемі-Сосі.**

Фатемі та Сосі встановили багатовісну модель довговічності для зсуву, який дозволяє розглядати появу та поширення тріщини. Амплітуда деформації зсуву у комбінації з максимальним нормальним напруженням використовуються як параметр пошкодження на площині максимального зсуву деформації, і модель

в основному використовується для прогнозування багатовісної втоми довговічності, де переважає зсув; довговічність можна розрахувати як:

$$\frac{\Delta\gamma_1}{2} \left( 1 + k \frac{\sigma_n^{max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma_f (2N_f)^{c_0} \quad (3.1)$$

де  $\Delta\gamma_1$  — максимальний розмах деформації зсуву на площині максимальної деформації зсуву,  $k$  — константа матеріалу,  $\sigma_n^{max}$  — максимальне нормальне напруження на площині максимальної деформації зсуву,  $\sigma_y$  — границя текучості,  $\tau_f$  і  $\gamma_f$  — коефіцієнти втомної міцності при зсуві і коефіцієнт пластичності зсуву, відповідно,  $b_0$  і  $c_0$  — показник втомної міцності при зсуві та показник пластичності на зсув, відповідно.  $G$  — модуль зсуву

3.2 Результати розрахунків довговічності титанових сплавів ВТ1-0, ВТ9 та сталі 45 в умовах багатовісного малоциклового навантажування.

Напруження і деформація на поверхні тонкостінних трубчастих зразків, яким піддається комбіноване розтяг-стиск і крутильне навантаження можна виразити як

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & (1/2)\gamma_{xy} & 0 \\ (1/2)\gamma_{xy} & -\nu_{eff}\varepsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{eff}\varepsilon_x \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\nu_{eff} = \frac{\nu_e \varepsilon_e + \nu_p \varepsilon_p}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \quad (3.3)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$  — нормальне і дотичне напруження, відповідно,  $\varepsilon_x$ ,  $\gamma_{xy}$  — лінійна деформація і деформація зсуву,  $\nu_{eff}$  — ефективний коефіцієнт Пуассона,  $\nu_e$  — пружний коефіцієнт Пуассона,  $\nu_p$  — пластичний коефіцієнт Пуассона, зазвичай рівний 0,5 для металічних матеріалів,  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_p$  — пружна і пластична деформація, відповідно,  $\theta$  — кут між віссю зразка і нормальним направленням елемента. Напруження-деформація може бути виражена так:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1-\nu_{eff}}{2} \varepsilon_x + \frac{1+\nu_{eff}}{2} \varepsilon_x \cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\theta) \quad (3.4)$$

$$\frac{\gamma_{\theta}}{2} = \frac{1+\nu_{eff}}{2} \varepsilon_x \sin(2\theta) - \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos(2\theta) \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos(2\theta) + \frac{\tau_{xy}}{2} \sin(2\theta) \quad (3.6)$$

Реакція напруження-деформація на критичній площині на розтяг та зсув виражається за допомогою рівнянь (3.4) - (3.6). Зокрема, максимальне лінійне розмах деформації  $\Delta\varepsilon_n$  і максимальний розмах деформації на зсув  $\Delta\gamma_{max}$  на кожній площинці можна розрахувати під синусоїдальним навантаженням наступним чином:

$$\gamma_{max} = \Delta\varepsilon \sqrt{\left[ \frac{\Delta\gamma}{\Delta\varepsilon} \cos(2\theta) \cos\varphi - (1 + \nu_{eff}) \sin(2\theta) \right]^2 + \left( \frac{\Delta\gamma}{\Delta\varepsilon} \cos(2\theta) \sin\varphi \right)^2} \quad (3.7)$$

$$\Delta\varepsilon_n = \frac{1}{2} \Delta\varepsilon \sqrt{\left[ 2(1 + \nu_{eff}) \cos^2 \theta - 2\nu_{eff} + \frac{\Delta\gamma}{\Delta\varepsilon} \sin(2\theta) \cos\varphi \right]^2 + \left( \frac{\Delta\gamma}{\Delta\varepsilon} \sin(2\theta) \sin\varphi \right)^2} \quad (3.8)$$

де  $\Delta\varepsilon$  — розмах лінійної деформації,  $\Delta\gamma$  — розмах деформації зсуву і кут  $\varphi$  — фазовий кут.

Класичне співвідношення Коффіна-Менсона, що описує одновісне руйнування на втому зі зміни деформації в циклі навантаження, має вигляд:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_c}{E} (2N)^b + \varepsilon_c (2N)^c \quad (3.9)$$

де  $\sigma_c$  — коефіцієнт втомної міцності (осьової),  $\varepsilon_c$  — коефіцієнт втомної пластичності (осьової),  $b$  і  $c$  — відповідні показники втомної міцності і пластичності.

У таблицях 3.1-3.3 приведені результати розрахунків за критерієм Фатемі-Сосі.

Таблиця 3.1. Розрахункові дані титанового сплаву ВТ9

$\gamma_{\theta}$ , %	$\gamma_{max}$ , %	$\varepsilon_{\theta}$ , %	$\varepsilon_M$ , %	$\theta$	$\sigma_n^{max}$	N, циклів
2.25	2.25	0	1,30	90	0	458
2.25	2.25	0	1,30	90	0	458
1,73	1,73	0	1,00	90	0	1396
1,95	1,95	0	1,13	90	0	821
1,73	1,73	0	1,00	90	0	1396
1.58	1.58	0	0,91	90	0	2155
1.21	1.21	0	0,70	90	0	9494
1.21	1.21	0	0,70	90	0	9494
2.527	2.527	0.637	1,9	45	1121.0	33
2.128	2.128	0.536	1,6	45	944.0	70
1.729	1.729	0.436	1,3	45	767.0	182
1.330	1.330	0.335	1	45	590.0	708
0.931	0.931	0.235	0,7	45	413.0	7095
2.006	2.655	0.316	1,30	71	325.5	105
2.006	2.655	0.316	1,30	71	325.5	105
1.543	2.042	0.241	1,00	71	250.3	311
1.543	2.042	0.241	1,00	71	250.3	311
1.071	1.417	0.169	0,69	71	173.8	1832
1.071	1.417	0.169	0,69	71	173.8	1832
2.838	2.703	0.447	1,30	71	460.4	75
2.838	2.703	0.447	1,30	71	460.4	75
2.182	2.079	0.344	1,00	71	354.1	225
2.182	2.079	0.344	1,00	71	354.1	225
1.527	1.454	0.240	0,70	71	247.7	1254

1.527	1.454	0.240	0,70	71	247.7	1254
-------	-------	-------	------	----	-------	------

Таблиця 3.2. Розрахункові дані титанового сплаву ВТ 1-0

$\gamma_{\theta}$ , %	$\gamma_{max}$ , %	$\varepsilon_{\theta}$ , %	$\varepsilon_M$ , %	$\theta$	$\sigma_n^{max}$ , МПа	N, циклів
2,22	2,23	0,56	1,68	45	940,8	61
1,53	1,53	0,38	1,15	45	644,0	243
1,42	1,42	0,36	1,07	45	599,0	319
1,10	1,10	0,28	0,83	45	464,8	872
0,81	0,81	0,20	0,61	45	341,6	3467
1,91	1,91	0	1,10	90	0	951
1,91	1,91	0	1,10	90	0	951
1,56	1,56	0	0,90	90	0	1764
1,56	1,56	0	0,90	90	0	1764
1,21	1,21	0	0,70	90	0	4238
1,21	1,21	0	0,70	90	0	4238
1,69	2,24	0,26	1,10	71	257,6	238
1,69	2,24	0,26	1,10	71	257,6	238
1,69	2,24	0,26	1,10	71	257,6	238
1,23	1,71	0,21	0,84	71	196,9	578
1,05	1,41	0,18	0,7	68	190,6	1029
1,05	1,41	0,18	0,7	68	190,6	1029
1,53	2,05	0,28	1,03	67	294,1	266
1,44	1,94	0,26	0,97	67	277,2	323
1,34	1,80	0,25	0,90	67	258,3	412
1,34	1,80	0,25	0,90	67	258,3	412
1,34	1,80	0,25	0,90	67	258,3	412
1,89	2,32	0,30	0,87	71	288,0	200



1,89	2,32	0,30	0,87	71	288,0	200
1,55	1,90	0,24	0,71	71	235,7	385
1,55	1,90	0,24	0,71	71	235,7	385
1,18	1,45	0,17	0,55	72	168,4	1035
1,18	1,45	0,17	0,55	72	168,4	1035
2,40	2,29	0,38	1,10	71	365,8	169
2,40	2,29	0,38	1,10	71	365,8	169
1,97	1,87	0,31	0,90	71	298,8	332
1,97	1,87	0,31	0,90	71	298,8	332
1,53	1,45	0,24	0,70	71	232,1	807
1,53	1,45	0,24	0,70	71	232,1	807

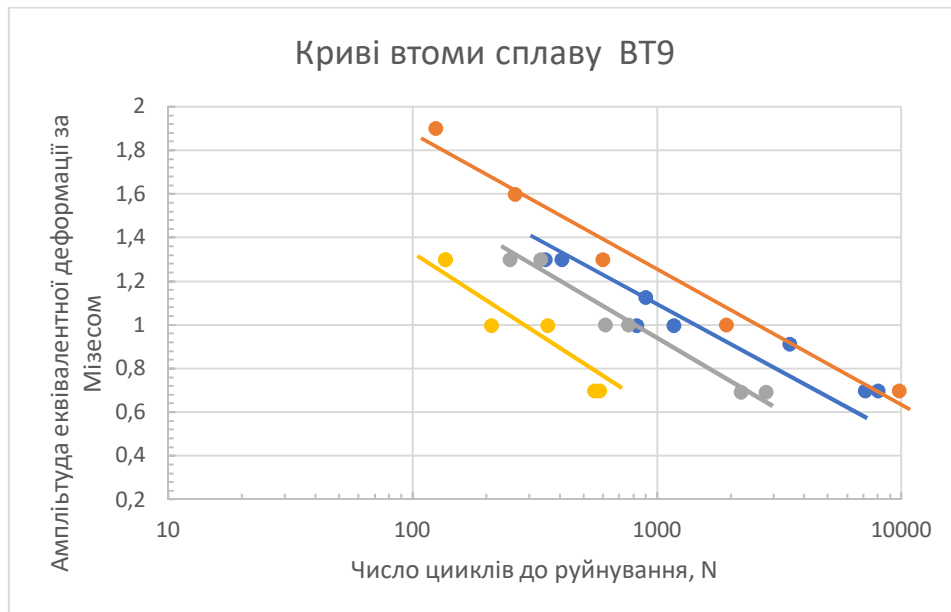
Таблиця 3.3. Розрахункові дані сталі 45

$\gamma_{\theta}$ , %	$\gamma_{max}$ , %	$\varepsilon_{\theta}$ , %	$\varepsilon_M$ , %	$\theta$	$\sigma_n^{max}$ , МПа	N, циклів
0,64	0,64	0,48	0,48	45	456,0	2211
0,78	0,78	0,59	0,59	45	560,5	1001
0,92	0,92	0,69	0,69	45	655,5	551
1,04	1,04	0,52	0,60	90	0	3623
1,39	1,39	0,69	0,80	90	0	1709
1,23	1,16	0,81	0,80	71	352,1	294
1,23	1,16	0,81	0,80	71	352,1	294
1,27	1,222	0,90	0,40	62	561,9	341
1,27	1,22	0,90	0,40	62	561,9	341
1,27	1,22	0,90	0,40	62	561,9	341
1,49	1,45	0,88	0,80	80	210,2	613
1,49	1,45	0,88	0,80	80	210,2	613
1,49	1,45	0,88	0,80	80	210,2	613
1,49	1,45	0,88	0,80	80	210,2	613
1,75	1,67	1,14	0,80	71	498,2	192
1,75	1,67	1,14	0,80	71	498,2	192
1,75	1,67	1,14	0,80	71	498,2	192
1,75	1,67	1,14	0,80	71	498,2	192
1,23	1,51	0,81	0,57	71	352,1	351
1,75	2,14	1,14	0,80	71	498,2	107
1,23	1,51	0,81	0,57	71	352,1	351
1,75	1,14	0,81	0,57	71	352,1	407

### 3.3 Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних.

На рисунках 3.1-3.3 приведені криві втоми, (а) деформації розраховувались за критерієм Мізеса, (б) деформації розраховувались за критерієм Фатемі-Сосі

а)



б)

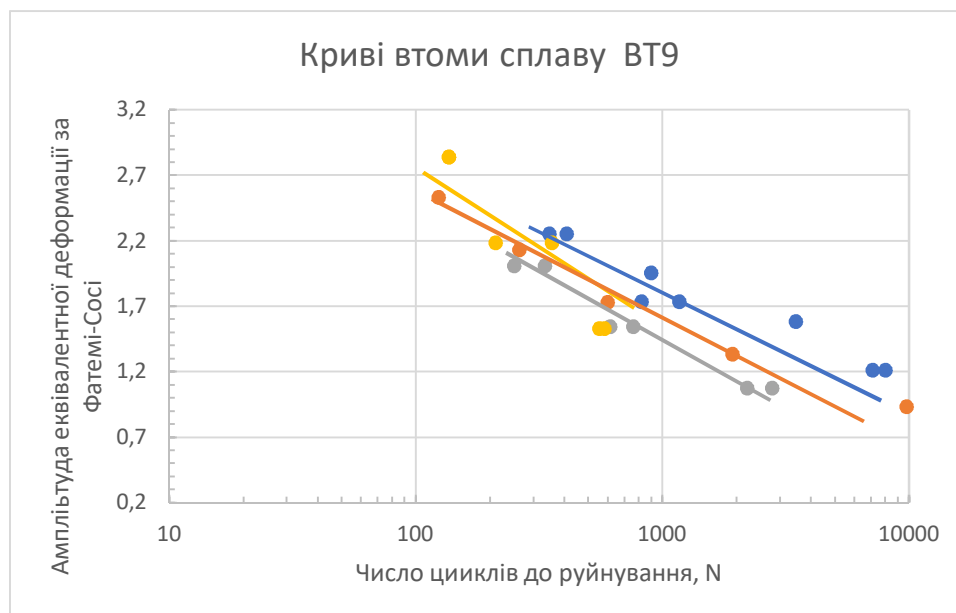
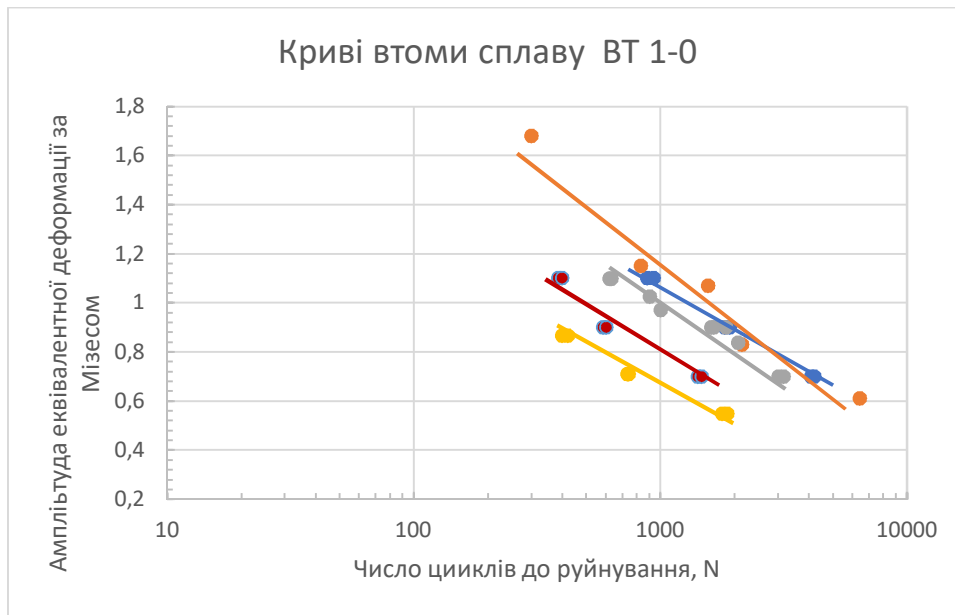


Рис 3.1. Криві втоми титанового сплаву ВТ9 відносно (а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

а)



б)

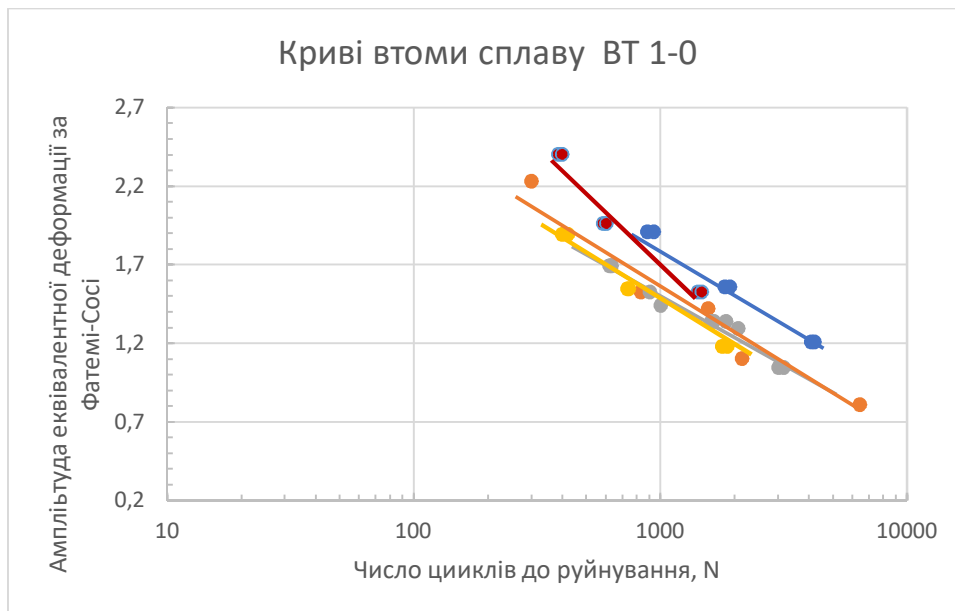
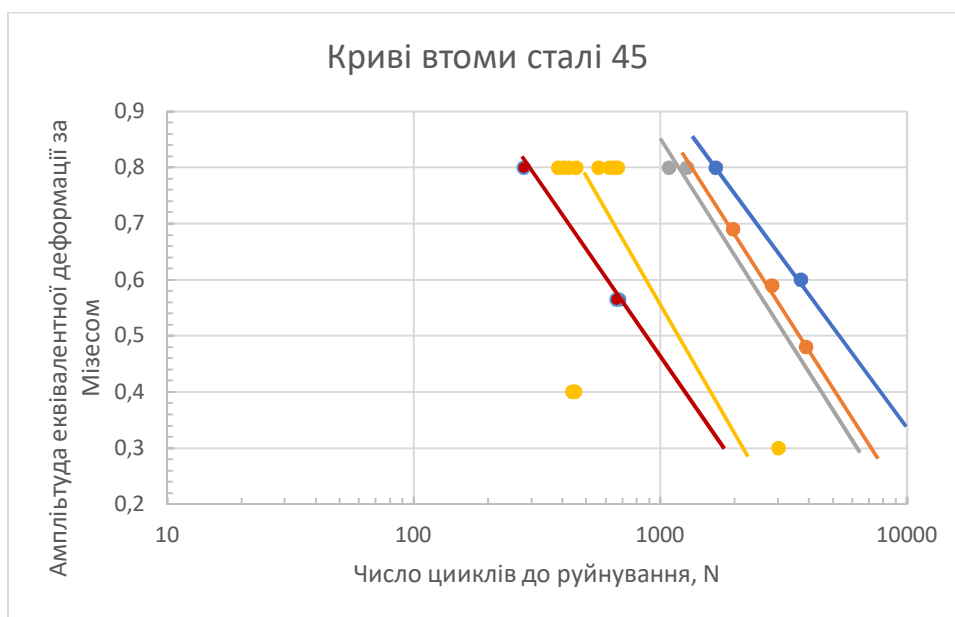


Рис 3.2. Криві втоми титанового сплаву ВТ 1-0 відносно (а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

а)



б)

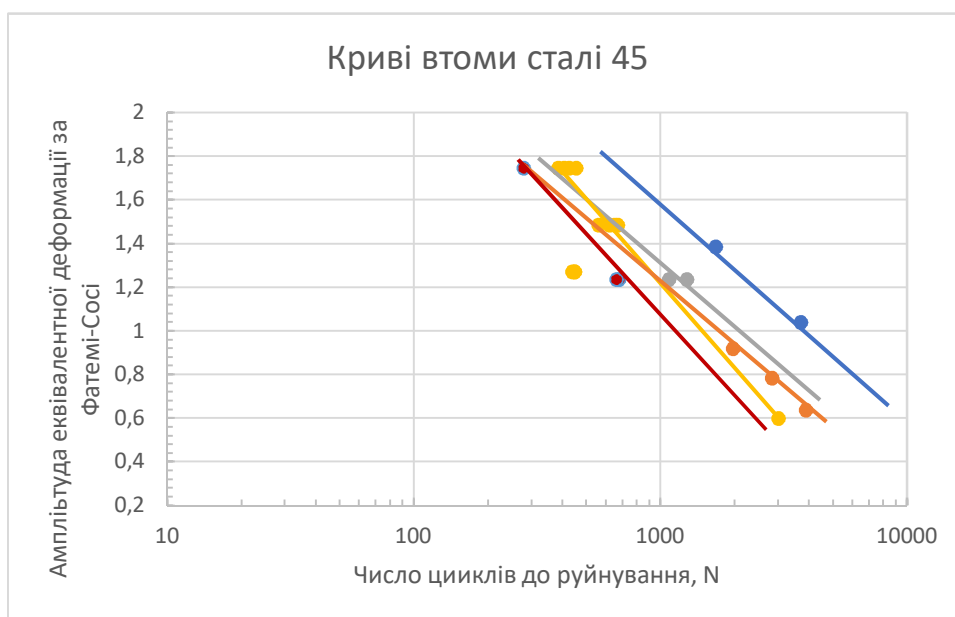


Рис 3.3. Криві втоми сплаву сталі 45 відносно (а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

Порівняємо отримані результати з експериментальними

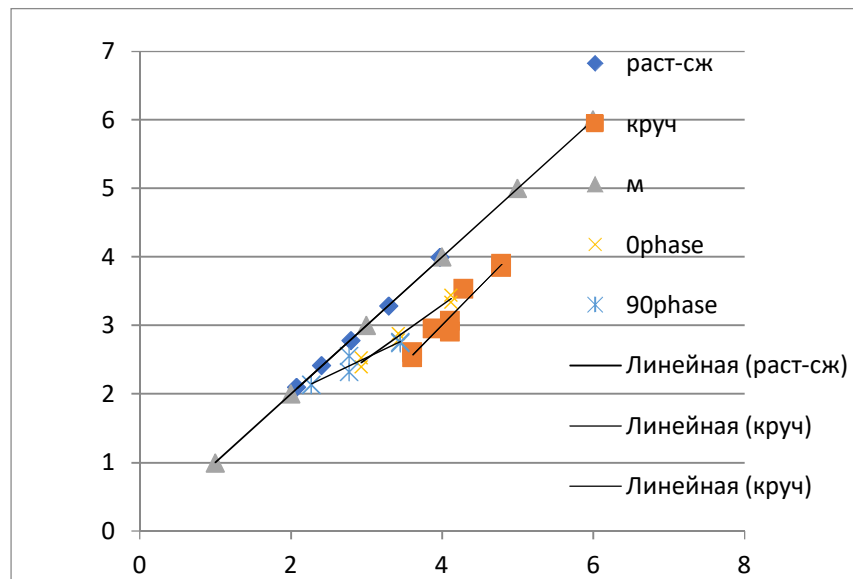
Таблиця 3.5 Розраховані за критерієм Мізеса та Фатемі-Сосі та експериментальна довговічність для титанового сплаву ВТ9

$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\Phi$	$N_e$ , циклів	$N_M$ , циклів	$N_{FS}$ , циклів
1,9	0	0	124	121	33
1,6	0	0	262	256	70
1,3	0	0	598	632	182
1,0	0	0	1920	1986	708
0,7	0	0	9780	9410	7095
0	2,25	0	348	4121	458
0	2,25	0	408	4121	458
0	1,73	0	822	12968	1396
0	1,95	0	898	7693	821
0	1,73	0	1168	12968	1396
0	1,58	0	3476	19261	2155
0	1,21	0	7090	61672	9494
0	1,21	0	8000	61672	9494
0,92	1,59	0	250	851	105
0,92	1,59	0	334	851	105
0,71	1,22	0	614	2662	311
0,71	1,22	0	760	2662	311
0,49	0,85	0	2202	13206	1832
0,49	0,85	0	2786	13206	1832
1,3	2,25	90	136	188	75
1,3	2,25	90	136	188	75
1,0	1,73	90	210	591	225
1,0	1,73	90	356	591	225

0,7	1,21	90	554	2804	1254
0,7	1,21	90	580	2804	1254

На рисунках 3.4-3.6 приводимо порівняння довговічностей у графічному вигляді з експериментальними даними, (а) деформації розраховувались за критерієм Мізеса, (б) деформації розраховувались за критерієм Фатемі-Сосі

а)



б)

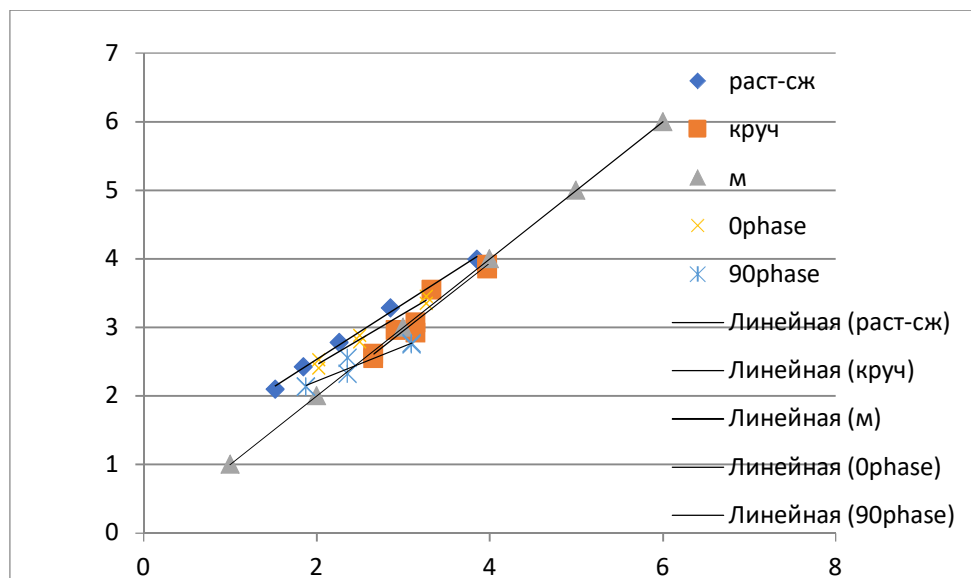


Рис 3.4. Порівняння дослідних і розрахованих довговічностей матеріалу ВТ9  
(а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

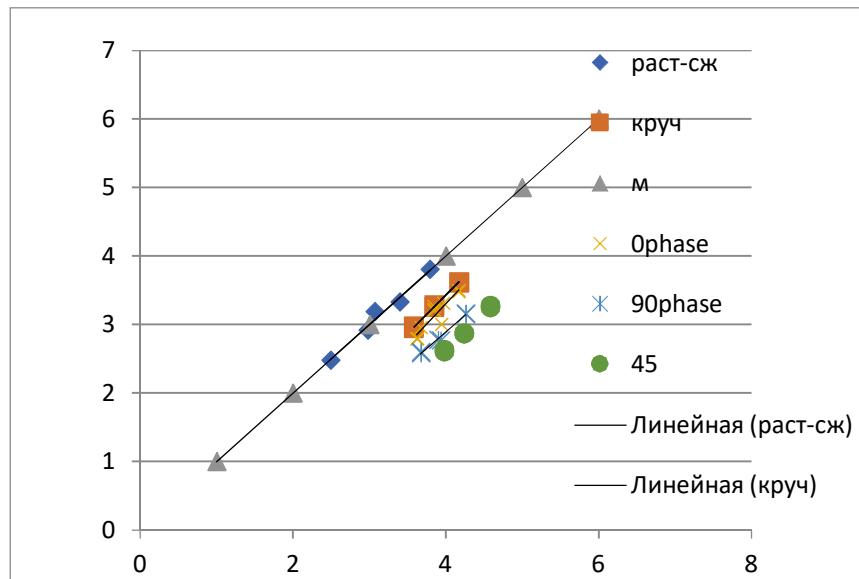
Таблиця 3.6 Розраховані за критерієм Мізеса та Фатемі-Сосі та експериментальна довговічність для титанового сплаву ВТ 1-0

$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\varphi$	$N_e$ , циклів	$N_M$ , циклів	$N_{FS}$ , циклів
1,68	0	0	300	308	61
1,15	0	0	830	949	243
1,07	0	0	1562	1176	319
0,83	0	0	2140	2498	872
0,61	0	0	6430	6232	3467
0	1,91	0	882	3841	951
0	1,91	0	940	3841	951
0	1,56	0	1820	7004	1764
0	1,56	0	1906	7004	1764
0	1,21	0	4090	14887	4238
0	1,21	0	4200	14887	4238
0,78	1,34	0	620	4169	238
0,78	1,34	0	632	4169	238
0,78	1,34	0	630	4169	238
0,59	1,03	0	2062	9333	578
0,55	0,75	0	3008	14791	1029
0,55	0,75	0	3160	14791	1029
0,82	1,07	0	904	4677	266
0,78	1,00	0	1000	8710	323
0,72	0,94	0	1606	6918	412
0,72	0,94	0	1644	6918	412
0,72	0,94	0	1840	6918	412
0,87	1,50	45	400	9550	200
0,87	1,50	45	422	9550	200



0,71	1,23	45	736	17378	385
0,71	1,23	45	744	17378	385
0,53	0,95	45	1780	38904	1035
0,53	0,95	45	1862	38904	1035
1,10	1,91	90	384	4677	169
1,10	1,91	90	398	4677	169
0,90	1,56	90	586	8511	332
0,90	1,56	90	602	7943	332
0,70	1,21	90	1420	18197	807
0,70	1,21	90	1466	18197	807

а)



б)

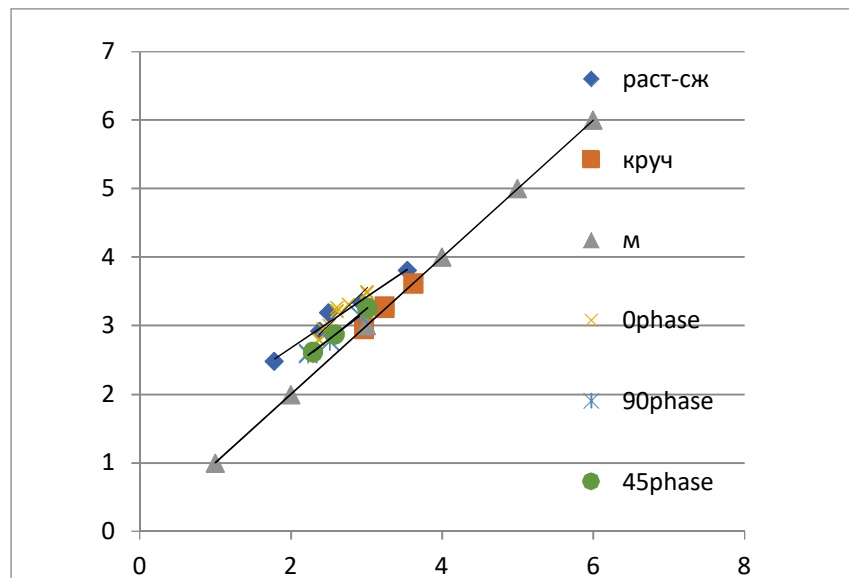
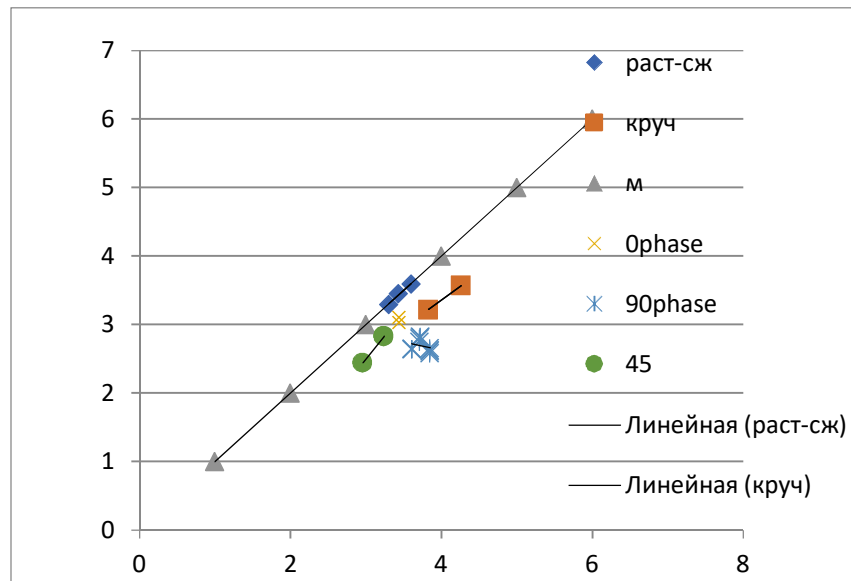


Рис 3.4. Порівняння дослідних і розрахункових довговічностей матеріалу ВТ 1-0  
(а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

Таблиця 3.7 Розраховані за критерієм Мізеса та Фатемі-Сосі та експериментальна довговічність для сталі 45

$\varepsilon_a$ , %	$\gamma_a$ , %	$\varphi$	$N_e$ , циклів	$N_M$ , циклів	$N_{FS}$ , циклів
0.	1.039	0	3715	18197	3623
0	1.386	0	1671	6761	1709
0,480	0	0	3881	3962	2211
0,590	0	0	2830	2698	1001
0,690	0	0	1962	2016	551
0.800	0.693	90	1085	2754	294
0.800	0.693	90	1279	2754	294
0.400	1.386	90	448	4074	341
0.400	1.386	90	440	4074	341
0.400	1,386	90	450	4074	341
0.400	1.386	90	622	5129	613
0,566	0.979	45	560	5129	613
0,800	1.386	45	670	5248	613
0,566	0.979	45	650	5248	613
0,566	0.979	60	681	1738	192
0,800	1.386	90	278	911	192
0,800	1.386	90	664	1738	192
0,800	1.386	90	544	1738	192
0,800	1.386	90	384	7079	351
33	0.566	0.979	426	7079	107
27	0.566	0.979	406	7079	351
34	0,800	0.693	455	7079	407

а)



б)

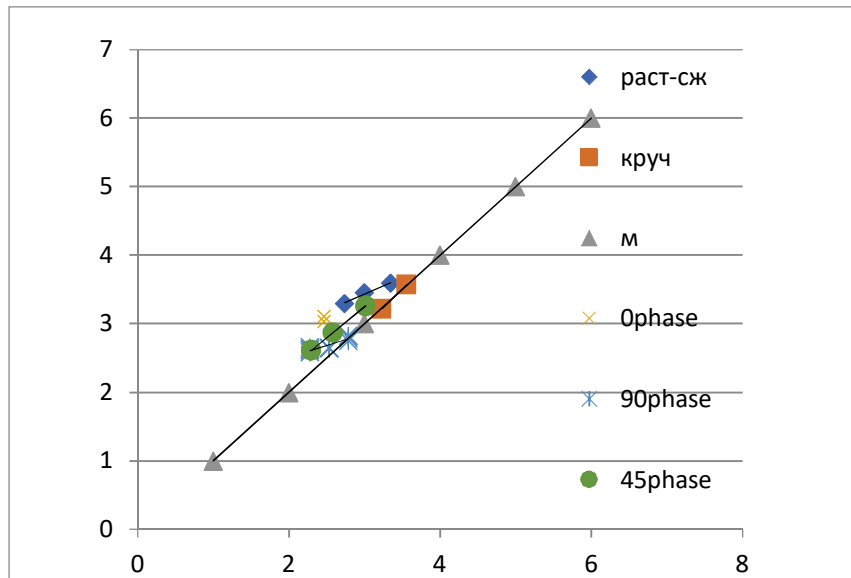


Рис 3.6. Порівняння дослідних і розрахункових довговічностей матеріалу сталь45 (а) деформації за Мізесом (б) деформації за Фатемі-Сосі

### 3.4 Висновки.

Показано, що використання в розрахунках критерію критичної площини Фатемі-Сосі, дає адекватну оцінку довговічності розглянутих металевих сплавів як в умовах пропорційного, так і непропорційного циклічного навантажування. В той час, як за класичним критерієм Губера-Мізеса не вдається з достатньою точністю передбачити довговічність навіть в умовах пропорційного циклічного навантажування. Враховуючи поширеність застосування критерію Губера-Мізеса у розрахунках на втомну міцність слід з обережністю відноситися до результатів таких розрахунків, особливо за умови непропорційного навантажування.

## Розділ 4. Розроблення стартап проекту

### 4.1. Опис ідеї проекту

В розділі проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

Таблиця 4.1 Опис стартап-проекту

Зміст проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Оцінювання довговічності металевих конструкцій в умовах багатовісного малоциклового навантажування	Машинобудівна галузь	1) Оцінка зміни геометрії на розподіл зусиль
		2) Врахування варіацій режимів навантаження

Запропонована автором отримана методика дозволяє оцінити довговічність металевих конструкцій в умовах багатовісного малоциклового навантажування. Ці значення можна використовувати при оцінці довговічності металевих конструкцій.

### 4.2. Технологічний аудит

Реалізувати ідею проекту можна за допомогою проектних розрахунків. В табл. 4.2 проведений аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї у порівнянні з конкурентом №1.

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	W	N	S
1.	Грошові витрати		—	Мій проект та конкурент
2.	Складність розрахунку	—	—	—
3.	Точна оцінка розподілу зусиль	Конкурент	—	Мій проект

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 4.3

Таблиця 4.3 технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Використання залежності, яка дозволяє визначити зміну внутрішніх зусиль від зміни геометрії моделі.	Теоретичний розрахунок	є	є
		Практичне використання		
Обрана технологія може бути реалізована				

По показникам характеристики стану ринку можна зробити висновок, що даний проект є рентабельним. Визначення потенційних груп клієнтів.

Потенційні групи клієнтів можна умовно поділити на первинних та вторинних споживачів продукту. Первинною групою є літальні апарати.

Надалі визначимо потенційні групи клієнтів (табл. 4.4).

Таблиця 4.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Проектування металевих конструкцій	Машинобудівна галузь	фінанси	Точність та розширення можливостей абсолютного використання ресурсу

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища, складаємо таблицю факторів, що допоможуть виходу проекту на ринок, та врахування факторів, що цьому можуть перешкодити (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення собівартості	Зменшення попиту використання	Вдосконалення вже існуючих методик
2.	Розробка покращеної методики		

Таблиця 4.6 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Не потребує великих затрат на використання	Економність	Достойна оплата праці
2.	Підвищений попит у галузі машинобудування	Проведення проектувальних робіт	Збільшення точності в оцінці довговічності металевих конструкцій

Надалі проведемо аналіз пропозиції, визначивши загальні риси конкуренції на ринку (табл.4.7).

Таблиця 4.7 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції олігополія	Невелика кількість підприємств, які ведуть між собою здебільшого нецінову конкуренцію.	Не відрізняється помітним впливом
Національний рівень конкурентної боротьби	Даний ринок достатньо відкритий	Помітний вплив на модернізації галузі
Внутрішньогалузева ознака	Боротьба ведеться між методиками розрахунків	Заощадження коштів в наслідок введення методики



Товаро-родова конкуренція за видом методики	Здатність задовольнити потреби галузі	Не велика кількість конкурентів
Нецінова конкуренція	Підвищення якості методики в порівнянні з іншими	Робота над постійним покращенням методики
Марочна інтенсивність	Розглядаємо в якості конкурентів схожі методики	Незалежність від ринку

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.8).

Таблиця 4.8. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари замітники
	Немає	Бар'єрів впровадження нема	Авіабудування	Загрози з боку заміників є
Висновки:	Низька інтенсивність	Є можливість входження в галузь	Диктують умови роботи на ринку. Такі, як час на розрахунок і забезпечення потрібним програмним забезпеченням	Відсутність обмежень від заміників

З огляду на конкурентну ситуацію існує можливість виходу на ринок даної галузі. Щоб бути конкурентоспроможним на ринку даному проекту необхідно розробити програмне забезпечення для швидкісного розрахунку методики.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл.4.8, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту табл.4.2, вимог споживачів до товару табл.4.4 та факторів маркетингового середовища табл.4.5-4.6 визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності.

Аналіз оформлюється в табл.4.9

Таблиця 4.9. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Менша потреба у витратах	Для методики розрахунку мала необхідність в затратах
2	Точність розрахунків	Удосконалення отримання результатів
3	Використання отриманих даних	Максимальне вичерпання ресурсу

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.9) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 10).

Таблиця 4.10. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг методики у порівнянні з проектом конкурента						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Менша потреба у витратах	20				●			
2	Точність розрахунків	20			●				
3	Використання отриманих даних	20					●		
4	Точність розрахунку в проекті	15					●		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.11) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і

слабких сторін (табл.4.10).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища.

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.11. SWOT–аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Безпечне вичерпання ресурсу елементів	Слабкі сторони: відсутність програмної підтримки методики
Можливості: завоювання всієї галузі	Загрози: розробка точнішої методики

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл.4.12)

Таблиця 4.12. Альтернативи ринкового впровадження стартаппроекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Публічне ознайомлення, перевірка з існуючими методиками (аналогами), державне затвердження	Висока	1-2 місяці

2	Публічне ознайомлення, перевірка на справжньому експерименті, державне затвердження	Висока	6 місяців
---	---	--------	-----------

Із зазначених альтернатив виберемо першу, бо отримання ресурсів є більш простим, а метод більш швидким.

#### 4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Авіабудування	Середня	Просто

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Альтернативна	Охоплення на 70-80 %	Конк.№1	Спеціалізація

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики то-вару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Копіювати лише загально використані ідеї	Стратегія заняття галузі

Результатом даного підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку:

- використання в проєкті сучасних технологій;
- напрямок роботи лише у заданій ніші ринку.

#### 4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у (табл. 4.16) потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.16. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Не потребує великих затрат на розрхунки	Зменшення собівартості	Достойна оплата праці
2	Підвищений попит у галузі машинобудування	Збільшення виробництва та ремонту	Збільшення кількості працівників

Далі визначаємо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.17).

Таблиця 4.17. Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
---	---	----------------------	--------------------------

Одноразова покупка	Інформування	Глибока	Державне затвердження методики
--------------------	--------------	---------	--------------------------------

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл.4.18).

Таблиця 4.18. Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Комунікабельні	Мережа інтернет, наукові праці	Реклама методики на конференціях	Розширення цільових клієнтів	Показати, що інша методика краща та доцільніша

Результати маркетингового дослідження:

- даний стартап-проект є актуальним, тому що може вивести машинобудівну галузь на наступну сходинку
- мала кількість конкурентів
- унікальність ідеї

## 5 . Загальні висновки по роботі

У роботі проведено аналіз придатності моделі критичної площини Фатемі-Сосі для оцінювання довговічності елементів конструкцій, виготовлених з конструкційних сталей і титанових сплавів, в умовах пропорційного і непропорційного циклічного навантажування. У ході виконання роботи були виконані наступні задачі:

- проаналізовано існуючі підходи до оцінювання довговічності елементів конструкцій за багатовісного пропорційного і непропорційного циклічного навантажування;
- виконано порівняльний аналіз моделей багатовісного втомного руйнування на основі результатів експериментальних досліджень, виконаних для конструкційних сталей та титанових сплавів в умовах багатовісного втомного руйнування;
- сформульовано рекомендації щодо використання розглянутих критеріїв багатовісної втоми.

У роботі продемонстровано, що критерії критичної площини типу Фатемі-Сосі значно краще враховують специфіку багатовісного навантажування, зокрема, як для титанових сплавів ВТ9, ВТ 1-0, так і для конструкційної сталі 45, у той час як класичні підходи, наприклад критерій Губера-Мізеса, дають гірші результати. Тому в умовах багатовісного непропорційного навантажування слід віддавати перевагу застосуванню критеріїв що базуються на концепції критичної площини.



## 6 . Перелік посилань

1. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Держстандарт України, Київ, 1995. 40 с.
2. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неізотермическом малоцикловом нагружении/ - М.: Наука, 1079. – 295 с.
3. Nicholas R. Gates, Ali Fatemi A simplified cyclic plasticity model for calculating stress-strain response under multiaxial non-proportional loadings / European Journal of Mechanics - A/Solids Volume 59, September–October 2016, Pages 344-355
4. Jiang Y. A fatigue criterion for general multiaxial loading // Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct. 23. – 2000. – pp. 19 – 32.
5. Беналлал, Марки. Определяющие уравнения упруго–вязкопластичности для непропорционального циклического нагружения // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1988. – №3. – С. 68–84.
6. Дунг, Соси. Разработка определяющей модели для описания поведения металлов в условиях непропорционального циклического нагружения // Современное машиностроение. 1991. – №5. – С. 17–26.
7. Kanazawa K., Miller K.J., Brown M.W. Cyclic deformation of 1%Cr-Mo-V steel under out-of-phase loads. // Fatigue of engineering materials and structures. – 1979. – №2. – pp.217-228.
8. Itoh T., Nakata T., Sakane M., Ohnami M. Nonproportional Low Cycle Fatigue of 6061 Aluminium Alloy under 14 strain paths //In: Proceedings of the 5th International Conference Biaxial-Multiaxial Fatigue and Fracture, Cracow. – 1997. – vol. 1. – pp. 173 – 187.
9. Shang, De-Guang, et al. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach. International Journal of Fatigue, 2007, 29.12: 2200-2207.

10. LI, Yajing; REN, Bin; CHEN, Xu. Cyclic Deformation and Low-Cycle Fatigue for 316LN Stainless Steel under Non-proportional Loading. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. p. 08002.
11. Kida S., et al. Dislocation structure and non-proportional hardening of Type 304 stainless steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1997, 20.10: 1375-1386.
12. Донг, Сосиз, Робертсон Дислокационные структуры и упрочнение при непропорциональном нагружении //Современное машиностроение. - 1991. - №4. - С.32 - 42.
13. Itoh T., et al. Effect of stacking fault energy on cyclic constitutive relation under nonproportional loading. *Zairyo*, 1992, 41.468: 1361-1367.
14. Sakane Masao; Itoh Takamoto. Microstructural study of multiaxial low cycle fatigue. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2015, 33: 319.
15. Шукаєв С.М. Про зв'язок енергії дефекту упаковки з деформаційним зміцненням та довговічністю металів і сплавів при непропорційному мало цикловому навантаженні / Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2000. - №5. – С.97-102.
16. Shukayev Sergiy; Zakhovayko Oleksandr; Ponomarenko Timophiy. Multiaxial Low Cycle Fatigue Life Prediction Criteria: Comparisons and Results (F126) / Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, August 17 –22, 2003.
17. Fatemi Ali; Shamsaei Nima. Multiaxial fatigue: An overview and some approximation models for life estimation. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33.8: 948-958.
18. Pejkowski Łukasz; Skibicki Dariusz; Sempruch Janusz. High-cycle fatigue behavior of austenitic steel and pure copper under uniaxial, proportional and non-proportional loading. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 60.9: 549-560.
19. Gough H.J. Engineering steels under combined cyclic and static stresses // *Journal of Applied Mechanics*. Trans ASME. – 1950. – vol.72. – pp. 113 – 125.

20. Серенсен С.В. О сопротивлении усталости при сложном напряжённом состоянии и симметричном цикле – В кн. Некоторые вопросы усталостной прочности стали. М.; Л.: Машгиз, 1953. – с. 102 – 115.
21. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. – К.: Наукова думка, 1976. – 416 с.
22. Биргер И.А. Об одном критерии разрушения и пластичности // Механика твёрдого тела. – 1977. № 4. – с. 143 – 150.
23. Brown M.W., Miller K.J. A Theory For Fatigue Failure Under Multiaxial Stress-Strain Conditions // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1973. – vol.187. – pp. 745 – 755.
24. Макинд А., Нил К. Обобщенный критерий малоциклового усталостного разрушения при многоосном нагружении. Современное машиностроение. – 1990. – Сер.Б. - №2. – С.59 – 65.
25. Dariusz Skibicki, Łukasz Pejkowski Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models\ International Journal of Fatigue 102 (2017) 18–36.
26. Chen X., Xu S., Huang D. A Critical Plane – Strain Energy Density Criterion for Multiaxial Low-Cycle Fatigue Life under Non-proportional Loading // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – vol. 22. – 1999. – pp. 679 – 686.
27. Itoh T., Sakane M., Ohnami M., Kida S., Sosie D. F. Dislocation Structure and Non-Proportional Hardening of Type 304 Stainless Steel // In: Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference Biaxial-Multiaxial Fatigue and Fracture, Cracow. - 1997. - vol. 1. - pp. 189 – 206.
28. Borodii M.V. Stizhalo V.A. Analysis of the experimental data on a low cycle fatigue under nonproportional straining // Int. J. Fatigue. – vol. 22 – 2000 – pp. 275–282.
29. Бородий М.В. К вопросу определения коэффициента непропорциональности цикла // Проблемы прочности. – 1995. – № 5-6. – с. 29-38.
30. Garud Y.S. A New Approach to the Evaluation of Fatigue under Multiaxial Loadings // Trans. ASME JEMT 103. – 1981. – pp.113 – 125.

31. Socie D.F. Multiaxial Fatigue Damage Models // Trans. ASME JEMT. 109. - 1987. - pp. 293 - 298.
32. Smith K.N., Watson P., Topper T.H. A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals // Journal of Materials, 5(4). – 1970. – pp. 767 – 776.
33. Шукаєв С.М., Гладський М.М. Про застосування двох параметрів непропорційності процесу навантаження // Вестник НТУ "ХПИ" Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. - №9, т.9., с.114 – 120.
34. Бородий М.В. О разработке деформационного критерия малоциклового усталости // Пробл. прочности. – 2001. – №3. – с. 29-37.
35. Шукаєв С.М. Про зв'язок енергії дефекту упаковки з деформаційним зміцненням та довговічністю металів і сплавів при непропорційном малоцикловому навантаженні // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2000. – № 5. – с. 97-102.
36. Бородий М.В. Наближений метод визначення максимальних рівнів зміцнення при непропорційному деформуванні металів // Проблеми міцності. – 2005. – № 8. – с.
37. Liu Y., Mahadevan S. Strain-based multiaxial fatigue damage modelling // Fatigue Fracture Engn Mater Struct, 2005, – Vol. 28. – pp. 1177-1189.
38. Metal Fatigue Analysis Handbook: Practical Problem-Solving Techniques for Computer-Aided Engineering / Yung-Li Lee, Mark E. Barkey // Elsevier Inc., 2012, – P. 580.
39. Shamsaei, N., and Fatemi, A., “Effect of Microstructure and Hardening on Non-proportional Cyclic Hardening Coefficient and Predictions,” Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 3015-3024, 2010.
40. Шукаєв С. Н. Деформирование и долговечность титанового сплава ВТ9 в условиях непропорционального малоциклового нагружения / Проблемы прочности, №4, 2001

41. Takahiro Morishitaa, Yuta Takadab, Fumio Ogawaa, Noritake Hiyoshic, Takamoto Itoha Multiaxial fatigue properties of stainless steel under seven loading paths consisting of cyclic inner pressure and push-pull loading / Theoretical and Applied Fracture Mechanics 96 (2018) 387–397.
42. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении, 1988. 282 с.
43. Brown M. W., Miller K. J. A Theory for Fatigue Failure Under Multiaxial Stress-Strain Conditions. // Proc. Inst. Mech. Engrs. - 1973. - vol. 187. - pp. 745 - 755.
44. Brown M. W., Miller K. J. High Temperature Low-Cycle Biaxial Fatigue of Two Steels. // Fatigue of engineering materials and structures. - 1979. - №1. - pp. 217 - 229.
45. Fatemi A. and Socie D.F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. Fatigue Fract Eng Mater Struct 1988; 11(3): 149–165.
46. Smith RN, Watson P and Topper TH. A stress-strain parameter for the fatigue metals. J Mater 1970; 5(4): 767–778.
47. BIN, Li; JIANHUI, Liu; XIULI, Wang. A new multiaxial fatigue life prediction model considering additional hardening effect. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12.6: 1687814020935331.
48. Nima Shamsaei, Maksym Gladskyi, Kostyantyn Panasovskyi, Sergiy Shukaev, Ali Fatemi, / International Journal of Fatigue 32 (2010) 1862–1874
49. N. Shukaev Deformation and Life of Titanium Alloy Vt9 Under Conditions of Nonproportional Low-Cycle Loading / Strength of Materials, Vol. 33, No. 4, 2001
50. De-Guang Shang \*, Guo-Qin Sun, Jing Deng, Chu-Liang Yan / International Journal of Fatigue 29 (2007) 2200–2207
51. Н. Г. БУРАГО, А. Б. ЖУРАВЛЕВ, И. С. НИКИТИН / МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА № 6 · 2011
52. Поведение стали при циклических нагрузках. Под ред. проф. В. Даля, М.: Металлургия, 1983. – с. 457.
53. B. C. LI, C. JIANG, X. HAN and Y. L / 2013 Wiley Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2014, 37, 206–218

54. Masao Sakane, Takamoto Itoh / M. Sakane et alii, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 33 (2015) 319-334; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.33.36
55. Л. Б. ПОТАПОВА, В. П. ЯРЦЕВ *Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения?* – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2005. – 244 с
56. Шукаев С.М. *Критерии предельного состояния металлических сплавов при двухосном малоцикловом нагружении.* – Автореф. диссерт. на соиск. степ. д.т.н. – Киев: НТУУ "КПИ". – 1996.